

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN *CASTOR OIL* PADA SOLAR
TERHADAP PERFORMA MESIN DIESEL DENGAN VARIASI RASIO
KOMPRESI**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN *CASTOR OIL* PADA SOLAR
TERHADAP PERFORMA MESIN DIESEL DENGAN VARIASI
RASIO KOMPRESI**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



UTSMAN BARIDHONO
NIM. 145060207111012

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 18 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng
NIP 19831023 201504 2 002

Mengetahui,
KELOMPOK PROGRAM STUDI S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau di terbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis di kutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi ini dibatalkan, serta di proses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 18 Juli 2018

Mahasiswa,



Utsman Baridhono
NIM. 145060207111012

TURNITIN



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 113/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

UTSMAN BARIDHONO

Dengan Judul Skripsi :

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN CASTOR OIL PADA SOLAR TERHADAP
PERFORMA MESIN DIESEL DENGAN VARIASI RASIO KOMPRESI

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 17 JUL 2018



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN *CASTOR OIL* PADA SOLAR TERHADAP PERFORMA MESIN DIESEL DENGAN VARIASI RASIO KOMPRESI

Nama Mahasiswa : Utsman Baridhono
NIM : 145060207111012
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
Pembimbing II : Nafisah Arina Hidayati, ST., M. Eng.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Ir. Erwin Sulistyono, MT.
Dosen Penguji 3 : Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.

Tanggal Ujian : 04 Juli 2018
SK Penguji : 1337/UN10.F07/SK/2018





*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayah, Ibu , dan Kakak
Yang Selalu Memberikan Dukungan Berupa
Motivasi, Dukungan Serta Keyakinan Kepada Penulis
Hingga Skripsi Ini Diselesaikan Dengan Baik*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Pengaruh Penambahan *Castor Oil* pada Solar terhadap Performa Mesin Diesel dengan Variasi Rasio Kompresi**”. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, akan tetapi diharapkan segala usaha yang telah dilakukan dapat menjadi ilmu yang bermanfaat.

Selama proses penulisan dan penyelesaian skripsi ini, penulis banyak memperoleh bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tanpa bantuan dan dukungan yang didapat tidak mungkin skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu penulis dengan tulus hati ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan tantangan, bimbingan, nasihat, dan motivasi bagi penulis.
5. Ibu Nafisah Arina Hidayati, ST., M. Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan dan saran yang sangat membantu dalam penulisan dan pengerjaan skripsi ini..
6. Mas Eko Slamet Mujiyanto selaku laboran motor bakar yang telah membantu dalam peneitian ini.
7. Kedua orang tua Agus Nurhandoyo dan Suhartini serta kakak kandung Narasena yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa yang tak terhingga sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

8. Teman rekan penelitian Andhika, Viki, Ikram dan Dana yang telah membantu dalam pengerjaan skripsi ini mulai awal sampai akhir.
9. Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
10. Rekan-rekan asisten Studio Elemen Mesin FT-UB yaitu Raka, Faizal, Resza, Nicky, Rikky, Teguh, Efrida, Rafiq, David dan Ekoy yang telah memberikan dukungannya dalam penyelesaian skripsi ini.
11. Teman-teman dari BONLAP yang telah memberikan semangat kepada penulis.
12. Seluruh teman Himpunan Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya periode 2017-2018 yang selalu bersedia menjadi tempat keluh kesah saya selama penelitian ini.
13. Seluruh teman mesin angkatan 2014 MAF14 Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya yang selalu menghibur saya dalam keadaan susah dan memberikan motivasi yang sangat berguna selama pengerjaan penelitian ini.
14. Rekan – rekan sepermainan yaitu Zalbie, Raka, Padang, Komeng, Jipau, Sendi, Ray, Adam, Fraghian, Adib, Cut, Ditha, Adin, Nadya, Adis yang selalu memberikan dukungan dan bantuannya dalam penyelesaian skripsi ini.
15. Berbagai pihak yang telah memberikan banyak dukungan yang tidak ternilai.

Akhir kata, semoga amal, bantuan, bimbingan dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna baik dari isi maupun format penulisan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar kedepannya menjadi lebih baik. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, memunculkan ide baru dan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya. Amin.

Malang, 30 Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|--------------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| DAFTAR LAMPIRAN | ix |
| RINGKASAN | x |
| SUMMARY | xi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya | 5 |
| 2.2 Dasar – Dasar Mesin Diesel | 6 |
| 2.3 Cara Kerja Mesin Diesel (4 Langkah) | 6 |
| 2.4 Siklus Termodinamika Mesin Diesel | 8 |
| 2.5 Pembakaran Bahan Bakar Dalam Mesin Diesel | 9 |
| 2.6 Rasio Kompresi | 10 |
| 2.6.1 Pengaruh Rasio Kompresi dan Tekanan Silinder | 10 |
| 2.6.2 Mengubah Rasio Kompresi | 11 |
| 2.7 Unjuk Kerja Mesin Diesel | 13 |
| 2.8 Masalah Yang Terjadi Pada Pembakaran | 14 |
| 2.8.1 Pengapian Dini (<i>Pre Ignition</i>) | 14 |
| 2.8.2 Detonasi atau <i>Knocking</i> | 14 |
| 2.9 Bahan Bakar Mesin Diesel dan Biodiesel | 15 |
| 2.9.1 Bahan Bakar Mesin Diesel | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.9.2 Bahan Bakar Biodiesel (<i>Castor Oil</i>) | 17 |
| 2.10 Karakteristik Bahan Bakar | 19 |
| 2.10.1 Angka <i>Cetane</i> | 19 |
| 2.10.2 Viskositas | 20 |
| 2.10.3 Nilai Kalor Bahan Bakar Minyak | 20 |
| 2.10.4 Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>) | 21 |
| 2.10.5 Titik Nyala (<i>Flash Point</i>) | 21 |
| 2.10.6 Kandungan Belerang (<i>Sulphur Content</i>) | 21 |
| 2.10.7 Titik Tuang (<i>Pour Point</i>) | 22 |
| 2.10.8 Kadar Abu (<i>Ash</i>) | 22 |
| 2.10.9 <i>Ignition Quality</i> | 22 |
| 2.11 Proses Pembakaran | 22 |
| 2.12 Karakteristik Kinerja Motor Bakar | 23 |
| 2.12.1 Torsi | 23 |
| 2.12.2 Daya Efektif | 24 |
| 2.12.3 <i>Specific Fuel Consumption</i> (SFCe) | 24 |
| 2.12.4 Efisiensi Termal Efektif (η_e) | 25 |
| 2.13 Hipotesis | 25 |

BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 27

| | |
|--|----|
| 3.1 Metode Penelitian | 27 |
| 3.2 Variabel Penelitian | 27 |
| 3.3 Waktu dan Pelaksanaan Penelitian | 28 |
| 3.4 Instalasi dan Alat Penelitian Yang Digunakan | 28 |
| 3.4.1 Modifikasi Gasket | 30 |
| 3.4.2 Pencampuran Bahan Bakar Biodiesel-Solar | 34 |
| 3.5 Alat Pengukuran dan Bahan Yang Digunakan | 34 |
| 3.6 Prosedur Pengambilan Data | 40 |
| 3.7 Diagram Alir Penelitian | 41 |

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 43

| | |
|----------------------------------|----|
| 4.1 Analisa Data | 43 |
| 4.1.1 Data Hasil Pengujian | 43 |

| | |
|--|----|
| 4.1.2 Pengolahan Data..... | 44 |
| 4.2 Pembahasan Grafik | 46 |
| 4.2.1 Hubungan Putaran Terhadap Torsi..... | 46 |
| 4.2.2 Hubungan Putaran Terhadap Daya Efektif | 49 |
| 4.2.3 Hubungan Putaran Terhadap <i>Specific Fuel Consumption Effective</i> | 51 |
| 4.2.4 Hubungan Putaran Terhadap Efisiensi Termal Efektif | 54 |
| 4.3 Penggunaan Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Alternatif | 56 |

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN59

| | |
|----------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan | 59 |
| 5.2 Saran..... | 59 |

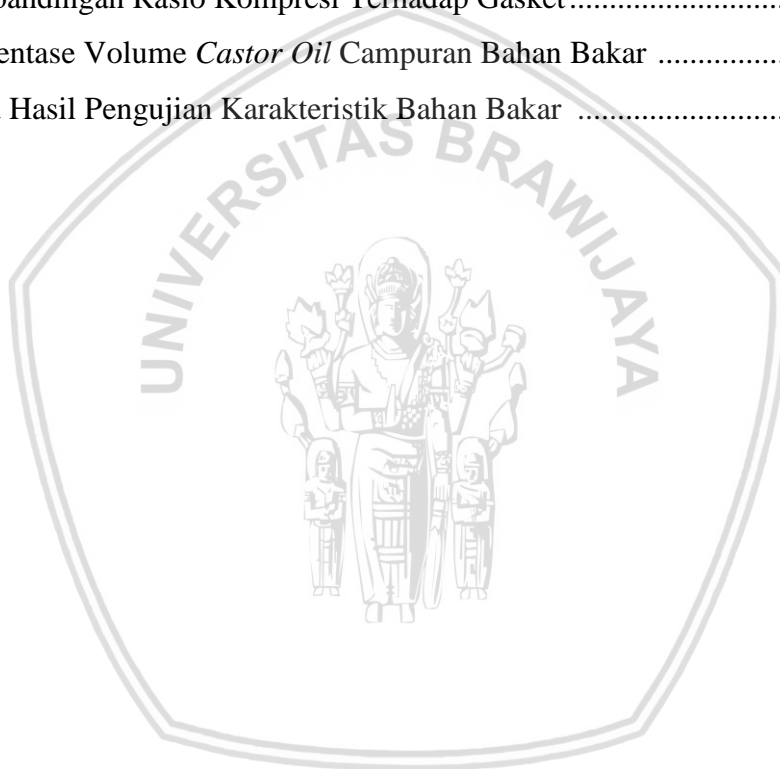
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

| No. | Judul | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 2.1 | Karakteristik Minyak Solar | 16 |
| Tabel 2.2 | Spesifikasi Bahan Bakar Diesel Yang Dibutuhkan | 17 |
| Tabel 2.3 | Properties Minyak <i>Castor</i> | 18 |
| Tabel 2.4 | Standar Karakteristik Biodiesel Indonesia | 19 |
| Tabel 3.1 | Spesifikasi <i>Diesel Engine</i> YANMAR LN 70D | 28 |
| Tabel 3.2 | Geometri Mesin Diesel YANMAR | 31 |
| Tabel 3.3 | Perbandingan Rasio Kompresi Terhadap Gasket | 33 |
| Tabel 4.1 | Persentase Volume <i>Castor Oil</i> Campuran Bahan Bakar | 43 |
| Tabel 4.2 | Data Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Bakar | 43 |



DAFTAR GAMBAR

| No. | Judul | Halaman |
|-------------|--|---------|
| Gambar 2.1 | Mesin diesel 4 langkah | 6 |
| Gambar 2.2 | Cara kerja mesin diesel 4 langkah | 7 |
| Gambar 2.3 | Gerakan piston dan <i>connecting rod</i> mesin diesel 4 langkah | 7 |
| Gambar 2.4 | (a) Diagram siklus diesel P-V (b) Diagram siklus diesel T-s | 8 |
| Gambar 2.5 | Siklus aktual mesin diesel empat langkah | 8 |
| Gambar 2.6 | Tahap pembakaran dalam mesin <i>compression ignition</i> | 9 |
| Gambar 2.7 | Menghitung rasio kompresi | 10 |
| Gambar 2.8 | Pengaruh rasio kompresi dan tekanan silinder | 11 |
| Gambar 2.9 | (a) Tipe kamar puser (b) Tipe ruang bakar kamar depan (c) Tipe injeksi langsung..... | 11 |
| Gambar 2.10 | Bentuk piston..... | 12 |
| Gambar 2.11 | <i>Turbocharger</i> mesin diesel..... | 12 |
| Gambar 2.12 | <i>Supercharger</i> mesin diesel..... | 13 |
| Gambar 2.13 | <i>Head gasket</i> | 13 |
| Gambar 2.14 | Grafik unjuk kerja mesin diesel..... | 14 |
| Gambar 2.15 | <i>Knocking</i> | 15 |
| Gambar 2.16 | <i>Combustion process</i> | 23 |
| Gambar 3.1 | Skema instalasi mesin diesel | 29 |
| Gambar 3.2 | Prinsip kerja <i>dynamometer</i> | 30 |
| Gambar 3.3 | Skema ruang silinder | 30 |
| Gambar 3.4 | Bentuk dimensi gasket..... | 32 |
| Gambar 3.5 | Campuran biodiesel-solar (a) 10%, (b) 20% dan (c) 30% pada volume 200 ml | 33 |
| Gambar 3.6 | Unit <i>engine</i> yanmar 170n | 34 |
| Gambar 3.7 | <i>Diesel engine test bench</i> | 34 |
| Gambar 3.8 | <i>Tachometer</i> | 34 |
| Gambar 3.9 | <i>Burret</i> | 35 |
| Gambar 3.10 | <i>Aerometeri</i> | 35 |
| Gambar 3.11 | <i>Viscometer</i> | 35 |
| Gambar 3.12 | <i>Flash point tester</i> | 36 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.13 <i>Bomb calorimeter</i> | 36 |
| Gambar 3.14 <i>Dynamometer</i> | 36 |
| Gambar 3.15 <i>Stopwatch</i> | 37 |
| Gambar 3.16 <i>Thermogun</i> | 37 |
| Gambar 3.17 Minyak Solar | 37 |
| Gambar 3.18 Biodiesel <i>castor oil</i> | 38 |
| Gambar 3.19 <i>Flowchart</i> penelitian..... | 42 |
| Gambar 4.1 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5 | 46 |
| Gambar 4.2 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5 | 46 |
| Gambar 4.3 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5 | 47 |
| Gambar 4.4 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5 | 49 |
| Gambar 4.5 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5 | 49 |
| Gambar 4.6 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5 | 50 |
| Gambar 4.7 Grafik hubungan putaran terhadap <i>specific fuel consumption effective</i> dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5 | 51 |
| Gambar 4.8 Grafik hubungan putaran terhadap <i>specific fuel consumption effective</i> dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5 | 52 |
| Gambar 4.9 Grafik hubungan putaran terhadap <i>specific fuel consumption effective</i> dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5 | 52 |
| Gambar 4.10 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5 | 54 |
| Gambar 4.11 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5 | 54 |
| Gambar 4.12 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5 | 55 |

DAFTAR LAMPIRAN

| No. | Judul |
|------------|----------------------------------|
| Lampiran 1 | Tabel Data Hasil Pengujian |
| Lampiran 2 | Tabel Data Hasil Pengolahan Data |



RINGKASAN

Utsman Baridhono, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, Analisis Pengaruh Penambahan *Castor Oil* Pada Solar Terhadap Performa Mesin Diesel Dengan Variasi Rasio Kompresi, Dosen Pembimbing : Mega Nur Sasongko dan Nafisah Arina Hidayati.

Mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam dimana proses pembakaran bahan bakar dilakukan dengan memanfaatkan temperatur tinggi hasil udara yang dikompresi didalam ruang silinder. Biodiesel adalah sebuah bahan bakar alternatif yang bisa dipakai secara langsung atau sebagai campuran dengan bahan bakar diesel dalam mesin diesel dengan perbandingan 0 sampai 100 %. Biodiesel dari minyak jarak kepyar (*Ricinus Communis*) merupakan salah satu bahan yang berpotensi untuk menggantikan solar. Selain memiliki sifat fisika-kimia yang sesuai dengan bahan baku biodiesel *castor oil* (*Ricinus Communis*) juga termasuk tanaman yang mudah untuk dibudidayakan. Akan tetapi penggunaan biodiesel bisa menurunkan performa mesin dibandingkan dengan solar biasa. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemakaian biodiesel harus diberikan modifikasi tertentu agar performanya bisa sama atau melebihi solar biasa, salah satu caranya adalah dengan mengubah rasio kompresi pada mesin diesel. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh rasio kompresi terhadap performa mesin diesel berbahan bakar campuran biodiesel *castor oil* dan solar. Dimana performa mesin yang didapatkan adalah torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar efektif (SFCe) dan efisiensi termal efektif.

Penelitian eksperimental secara langsung ini dilakukan dengan menggunakan bahan bakar campuran biodiesel B0, B10, B20 dan B30 dimana variasi rasio kompresi mesin diesel adalah 15.5, 17.5 dan 19.5. Rasio kompresi mesin diubah dengan cara mengubah ketebalan gasket dan pencampuran biodiesel dilakukan dengan cara menyampur biodiesel dan solar dengan persentase volume. Putaran mesin divariasikan dari 1600 sampai 2400 rpm dengan interval 200 rpm.

Dari hasil pengujian penggunaan bahan bakar biodiesel B20 pada rasio kompresi tertinggi 19.5 menghasilkan torsi 5.26 %, daya efektif 5.24 % dan efisiensi termal efektif 6,99 % lebih tinggi namun konsumsi bahan bakar efektif (SFCe) lebih besar 1.28 % daripada solar biasa. Dimana performa terbaik solar diperoleh pada rasio kompresi 19.5 dengan nilai torsi sebesar 0.399 kgf.m, daya efektif sebesar 1.337 PS, nilai SFCe sebesar 0.234 kg/PS.Jam dan efisiensi termal efektif sebesar 24.156 %.

Kata kunci: Mesin diesel, Biodiesel, *Castor Oil*, Performa Mesin, Rasio Kompresi

SUMMARY

Utsman Baridhono, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, June 2018, The Effect of Castor Oil Addition and Compression Ratio on The Performance of Diesel Engine, Academic Supervisor : Mega Nur Sasongko and Nafisah Arina Hidayati.*

*Diesel engines are internal combustion engines in which the combustion process of fuel is carried out by utilizing the high temperature of the compressed air results in the cylindrical chamber. Biodiesel is an alternative fuel that can be used directly or as a mixture with diesel fuel in diesel engines with a ratio of 0 to 100%. Biodiesel from castor oil (*Ricinus Communis*) is one of the materials that have the potential to replace diesel. In addition to having physico-chemical properties in accordance with raw materials biodiesel castor oil (*Ricinus Communis*) also includes plants that are easy to be cultivated. However, the use of biodiesel can reduce engine performance compared with ordinary diesel. This condition indicates that the use of biodiesel should be given certain modifications to its performance can be the same or more than ordinary diesel, one way is by changing the compression ratio on diesel engine. The purpose of this study is to determine the effect of compression ratio on diesel engine performance mixed fuel biodiesel castor oil and diesel fuel. Where engine performance is obtained torque, effective power, effective fuel consumption (SFCe) and effective thermal efficiency.*

This direct experimental study was conducted using mixed fuel biodiesel B0, B10, B20 and B30 where variations in diesel engine compression ratio were 15.5, 17.5 and 19.5. The engine compression ratio is modified by changing the thickness of the gaskets and the mixing process of biodiesel is done by mixing biodiesel and diesel with the percentage of volume. The engine rotation is varied from 1600 to 2400 rpm with intervals of 200 rpm.

From the results of testing the use of biodiesel fuel B20 at the highest compression ratio of 19.5 produce torque of 5.26%, effective power 5.24% and effective thermal efficiency 6.99% higher but effective fuel consumption (SFCe) 1.28% larger than ordinary diesel. Where the best performance of diesel fuel is obtained at 19.5 compression ratio with a torque value of 0.399 kgf.m, effective power of 1.337 PS, SFCe value of 0.234 kg / PS.Jam and effective thermal efficiency of 24.156%.

Keyword : *Engine Diesel, Biodiesel, Castor Oil, Engine Performance, Compression ratio*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Biodiesel merupakan salah satu jenis bahan bakar yang diproduksi dengan memakai minyak nabati atau dari lemak hewan melalui proses transesterifikasi maupun esterifikasi dengan bantuan alkohol dan penggunaan katalis (Dharsono, 2010). Biodiesel dapat digunakan sebagai bahan bakar campuran atau alternatif pada mesin diesel dimana efisiensi pembakaran lebih tinggi dibandingkan solar (Romano, 2011). Biodiesel dapat dibuat dari berbagai jenis minyak yang dihasilkan oleh tumbuhan seperti kelapa sawit, kedelai, bunga matahari, kemiri, kacang tanah, minyak jelantah, jarak dan tumbuhan lainnya. Salah satu contoh jenis tanaman yang banyak dibudidayakan dan berpotensi untuk diolah menjadi biodiesel adalah minyak jarak karena sifat fisika-kimianya sesuai dengan sifat bahan baku untuk biodiesel (Dennis, 2012). Jarak kepyar (*Ricinus communis*) merupakan salah satu jenis tanaman jarak yang dapat dimanfaatkan untuk biodiesel karena pada bijinya mengandung 40-60% minyak dengan komposisi terbesarnya 90% asam lemak (risinoleat) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar yang biasanya disebut sebagai minyak kastor atau *castor oil* (Mutlu, 2010). Sehingga melihat keuntungan salah satu bahan bakar alternatif ini mesin diesel sangat berpotensi untuk pengembangan bahan bakar alternatif sebagai bentuk penggunaan energi terbarukan.

Seperti yang kita ketahui sebagian besar kendaraan yang digunakan pada industri transportasi memakai kendaraan dengan mesin diesel. Mesin diesel merupakan motor pembakaran dalam yang menggunakan panas kompresi untuk membakar bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar. Pada mesin diesel, hanya udara yang dikompresi selama langkah kompresi sehingga menghasilkan panas dan mengeliminasi kemungkinan terjadinya *autoignition*. Mesin diesel juga didesain untuk beroperasi pada rasio kompresi yang tinggi (Cengel, 2014). Mesin diesel dengan solar biasa pada kenyataannya terbukti lebih efisien dibandingkan dengan mesin bensin. Akan tetapi penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar ternyata menurunkan performa mesin dibandingkan dengan penggunaan solar biasa (Walid, 2017). Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan biodiesel harus diberikan modifikasi tertentu agar pada penggunaannya bisa menghasilkan performa yang hampir sama dengan solar biasa.

Beberapa penelitian tentang penggunaan biodiesel sebagai campuran solar untuk bahan bakar mesin diesel banyak dikembangkan dengan tujuan mengetahui pengaruh campuran biodiesel terhadap performa mesin diesel. Penambahan minyak jarak pada bahan bakar solar memberikan pengaruh terhadap peningkatan efisiensi pembakaran mesin diesel (Premnath, 2014). Presentase kadar biodiesel juga berpengaruh terhadap performa mesin diesel, dimana performa optimum dicapai pada kadar konsentrasi 20% (Sheeju, 2015). Efisiensi tertinggi dari campuran biodiesel-solar bisa dicapai saat menggunakan rasio kompresi 17.5 (Sivaganesan, 2017). Akan tetapi seiring meningkatnya kadar konsentrasi biodiesel (*mahua oil*) akan menurunkan performa mesin dengan variasi kompresi 17 sampai 19 (Raheman, 2008). Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan dapat diketahui bahwa penggunaan biodiesel bisa menurunkan performa mesin seiring dengan kadarnya yang semakin meningkat. Biodiesel memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan solar sehingga temperatur yang dihasilkan juga rendah (Leily, 2013). Rasio kompresi yang tinggi diperlukan untuk meningkatkan temperatur pembakaran. Dikarenakan setiap jenis biodiesel mempunyai karakteristik yang berbeda maka performa yang dihasilkan belum tentu sama. Oleh karena itu sebagai upaya peningkatan performa mesin berbahan campuran biodiesel maka diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi rasio kompresi yang lebih tinggi pada biodiesel berbahan *castor oil*.

Berdasarkan latar belakang diatas penggunaan *castor oil* sebagai bahan biodiesel memerlukan modifikasi tertentu untuk menghasilkan performa mesin yang mendekati performa mesin diesel berbahan bakar solar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh rasio kompresi dengan bahan bakar campuran biodiesel-solar terhadap performa mesin diesel. Kadar campuran biodiesel (*castor oil*) yang dipakai pada penelitian ini adalah 10%, 20% dan 30% dengan menggunakan variasi kompresi 15.5, 17.5 dan 19.5 sehingga diharapkan performa penggunaan biodiesel bisa menyamai penggunaan solar biasa. Dengan hasil yang didapatkan dari penelitian yang meliputi daya poros, efisiensi termal efektif, torsi dan *specific fuel consumption* (SFC) pada mesin diesel berbahan bakar biodiesel-solar. Dari penelitian ini diharapkan bisa memberikan solusi kendaraan bermotor atau transportasi untuk menggunakan salah satu bentuk energi alternatif yang terbarukan dan sebagai bentuk pengembangan energi alternatif terbarukan di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, peneliti akan merumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh rasio kompresi dan pencampuran biodiesel (*castor oil*) pada solar terhadap performa mesin diesel.

1.3 Batasan Masalah

Di penelitian kali ini, peneliti membuat batasan permasalahan yang akan diteliti yang bertujuan untuk mempermudah dalam pengerjaan penelitian dan ruang lingkup penelitian tidak keluar dari topik permasalahan. Batasan permasalahan tersebut adalah:

1. Tidak adanya kebocoran pada saluran bahan bakar
2. Tidak membahas tentang pembuatan biodiesel
3. Mengabaikan gelembung udara yang terdapat pada saluran bahan bakar
4. Tidak menganalisis kelembapan udara dan massa jenis udara di sekitar tempat pengujian
5. Performa yang dihasilkan antara lain daya poros, torsi, *specific fuel consumption effective* dan efisiensi termal efektif

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian kali ini antara lain:

1. Mengetahui pengaruh rasio kompresi dengan bahan bakar campuran biodiesel-solar terhadap performa kinerja mesin diesel.
2. Mengetahui hasil performa mesin diesel dan rasio kompresi yang optimal dalam variasi rasio kompresi dengan menggunakan bahan bakar solar-biodiesel.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yang bisa diperoleh antara lain:

1. Memberikan solusi untuk sarana kendaraan bermotor atau transportasi dengan penggunaan biofuel yang lebih ramah lingkungan
2. Memberikan informasi kepada masyarakat atau khalayak umum tentang pengaruh biofuel yang dilihat dari performa mesin diesel
3. Sebagai salah satu dukungan kepada pemerintah terkait pengembangan bahan bakar biofuel
4. Sebagai literatur untuk penelitian selanjutnya



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

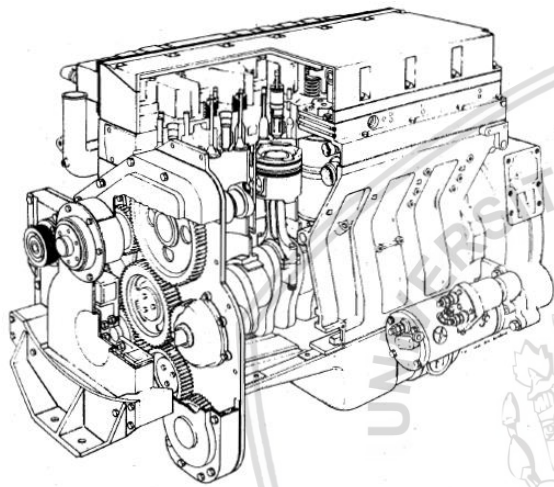
Selva Roji, *et al.* (2015) melakukan penelitian tentang efek rasio kompresi dengan biodiesel dan campurannya terhadap performa dan karakteristik emisi mesin diesel. Campuran bahan bakar biodiesel dengan kadar 20%, 40%, 60% dan 100% diuji dengan variasi rasio kompresi 16, 18, 20 dan 22 pada mesin diesel. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa dengan kadar biodiesel 100% pada berbagai variasi rasio kompresi memiliki efisiensi termal yang paling besar. Temperatur gas buang dan emisi gas NO_x juga semakin menurun seiring dengan meningkatnya rasio kompresi untuk semua kadar konsentrasi biodiesel. Performa mesin rata-rata bisa optimum saat menggunakan rasio kompresi 18 dengan kadar konsentrasi biodiesel 20%.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Singh, *et al.* (2016) tentang analisa karakteristik pembakaran dengan variasi rasio kompresi dengan menggunakan biodiesel dan campuran biodiesel (*castor oil*). Kadar konsentrasi campuran biodiesel yang digunakan yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dengan rasio kompresi yang digunakan adalah 15, 16, 17 dan 18. Setelah penelitian dilakukan, didapatkan bahwa *ignition delay* semakin kecil seiring dengan meningkatnya rasio kompresi pada semua konsentrasi biodiesel. Tekanan maksimum silinder diperoleh saat rasio kompresi 18 dengan kadar konsentrasi 50%. Temperatur gas rata-rata dan panas yang dilepaskan secara maksimum didapatkan saat rasio kompresi 18 dengan kadar biodiesel 0%. Fraksi massa yang terbakar memberikan hasil yang bagus ketika campuran biodiesel 20% dengan rasio kompresi 15 dan 18.

Sivaganesan, *et al.* (2017) meneliti tentang pengaruh *compression ratio* pada mesin diesel dengan campuran 20% konsentrasi bahan bakar biodiesel metil ester. Campuran bahan bakar diesel dan biodiesel diinjeksikan pada 23° BTDC ke dalam ruang bakar. Mesin tersebut menggunakan rasio kompresi sebesar 17.5, 16.5 dan 15.5. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa dengan campuran biodiesel 20% dengan rasio kompresi 17.5 mengalami peningkatan efisiensi. Dengan catatan bahwa seiring dengan meningkatnya kadar campuran biodiesel maka meningkat pula efisiensi termalnya. Dari penelitian ini juga bisa diketahui bahwa emisi yang dihasilkan dari penggunaan biodiesel lebih rendah daripada penggunaan bahan bakar diesel biasa

2.2 Dasar–Dasar Mesin Diesel

Mesin Diesel adalah motor bakar yang proses pengapiannya tidak menggunakan loncatan bunga api (pemantik atau pemicu). Konsep pembakaran pada mesin diesel adalah melalui proses penyalaan kompresi udara pada saat tekanan tinggi oleh piston ketika piston berada di posisi titik mati atas (TMA) kemudian bahan bakar disemprotkan ke ruang bakar melalui nosel sehingga terjadi pembakaran antara campuran bahan bakar dan udara di dalam silinder ruang bakar yang bertemperatur tinggi. Syarat terbakarnya bahan bakar mesin diesel bisa dipenuhi apabila perbandingan rasio kompresi yang digunakan sekitar 12 – 24 (Cengel, 2014).



Gambar 2.1 Mesin diesel 4 langkah
Sumber: Heywood (1988:33)

Mesin diesel juga sering disebut sebagai *compression ignition engines* karena pembakaran terjadi saat udara dikompresi pada ruang dengan perbandingan kompresi jauh lebih besar daripada motor bensin yang besarnya sekitar 7–12 (Astu Pudjanarsa, 2012).

2.3 Cara Kerja Mesin Diesel (4 Langkah)

Pada mesin diesel empat langkah tiap bekerja empat kali gerakan piston (dua kali putaran engkol) menghasilkan satu kali kerja.

Secara sistematis prinsip kerja motor diesel empat langkah dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Langkah Pemasukan

Pada langkah ini katup masuk terbuka dan katup buang tertutup. Udara mengalir masuk ke dalam ruang silinder.

2. Langkah Kompresi

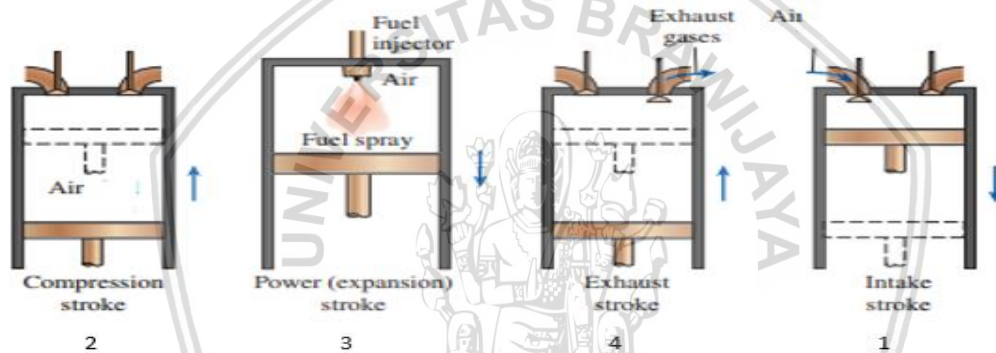
Di langkah ini kedua katup tertutup, piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) ke titik mati atas (TMA), sehingga menekan udara yang ada di dalam silinder. Sesaat sebelum mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan.

3. Langkah Ekspansi

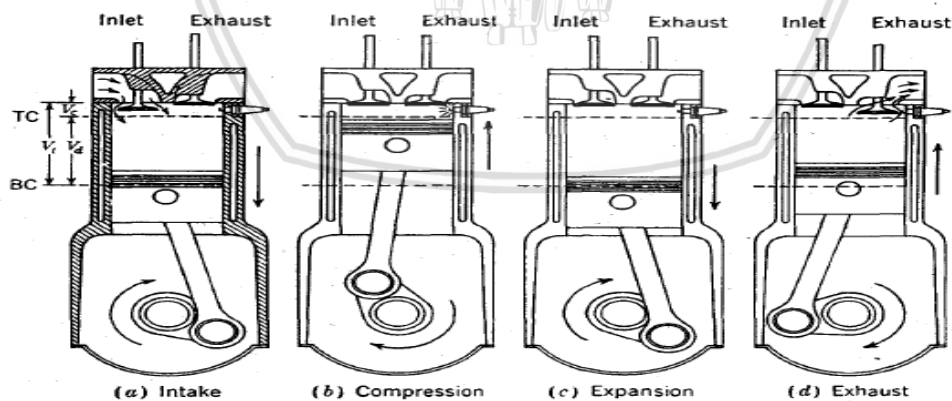
Karena bahan bakar diinjeksikan ke dalam silinder yang bertemperatur tinggi, bahan bakar terbakar dan berkelempasan menekan piston untuk melakukan kerja sampai piston mencapai TMB. Kedua katup tertutup untuk langkah ini.

4. Langkah Buang

Saat piston hampir mencapai TMB, katup buang terbuka, katup masuk tetap tertutup. Ketika piston bergerak menuju TMA, gas sisa pembakaran terbuang melalui ruang bakar. Akhir dari langkah ini adalah ketika piston mencapai TMA. Dan siklus berulang lagi.



Gambar 2.2 Cara kerja mesin diesel 4 langkah
Sumber: Cengel (2014:492)



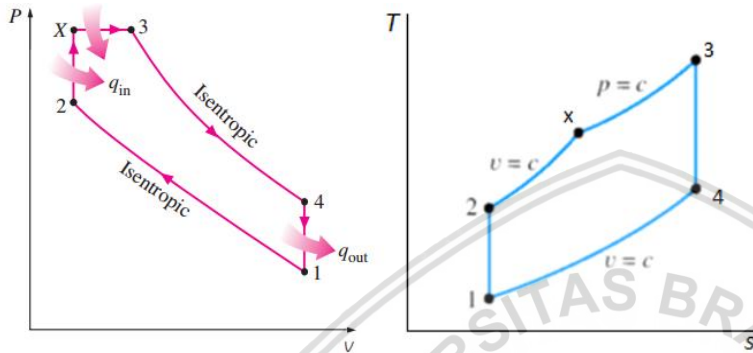
Gambar 2.3 Gerakan piston dan *connecting rod* mesin diesel 4 langkah
Sumber: Heywood (1988:10)

Pada mesin diesel, bahan bakar solar dibakar untuk menghasilkan energi panas atau termal. Energi ini selanjutnya dipakai untuk mendorong piston menjadi gerakan translasi kemudian dirubah oleh poros engkol menjadi gerakan mekanik.

2.4 Siklus Termodinamika Mesin Diesel

Siklus termodinamika adalah kumpulan atau serangkaian proses termodinamika yang menjelaskan dinamika perpindahan panas dan kerja dalam berbagai keadaan (temperatur, tekanan, dan keadaan lainnya) yang pada akhirnya sistem kembali ke kondisi semula.

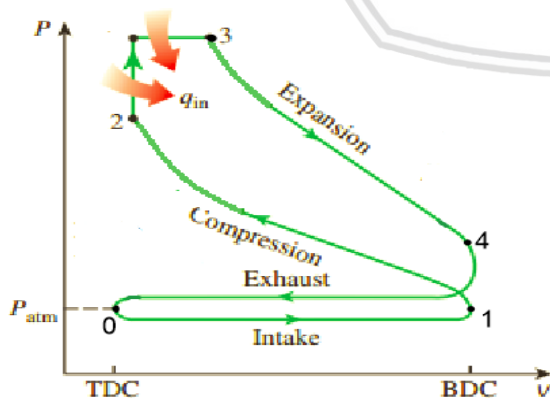
Siklus diesel adalah siklus teoritik untuk *compression ignition engines* atau mesin diesel. Pada siklus diesel penambahan panas terjadi pada tekanan tetap. Sehingga alasan ini yang menyebabkan siklus diesel seringkali disebut sebagai siklus tekanan tetap.



Gambar 2.4 (a) Diagram siklus diesel P-V (b) Diagram siklus diesel T-s
Sumber: Cengel (2014:501)

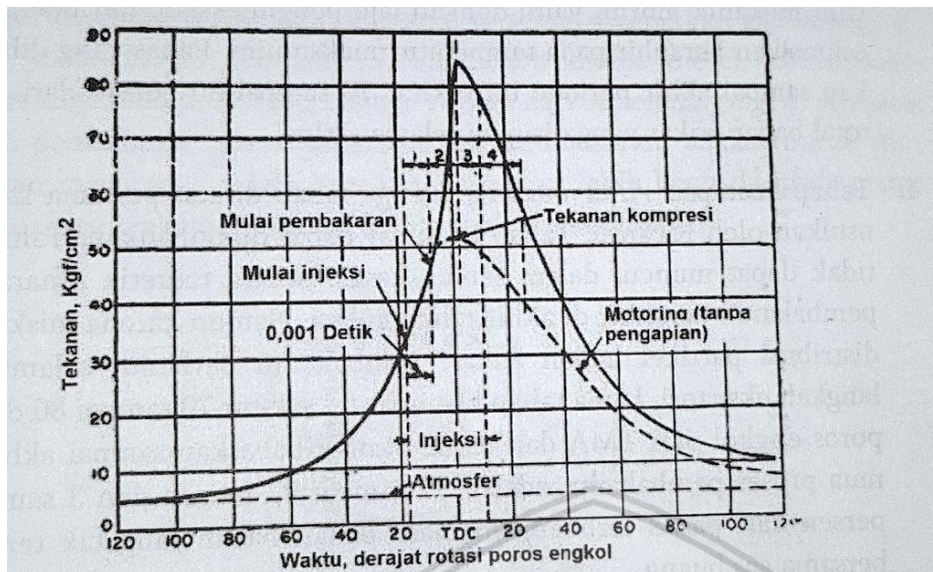
Langkah siklus ini adalah:

1. Langkah (0-1) adalah langkah hisap, tekanan (p) konstan
2. Langkah (1-2) adalah langkah kompresi, kondisi isentropik
3. Langkah (2-3) adalah proses pemasukan kalor, tekanan konstan
4. Langkah (3-4) adalah proses ekspansi secara isentropik
5. Langkah (4-0) adalah langkah pengeluaran kalor



Gambar 2.5 Siklus aktual mesin diesel empat langkah
Sumber: Cengel (2014:500)

2.5 Pembakaran Bahan Bakar Dalam Mesin Diesel



Gambar 2.6 Tahap pembakaran dalam mesin *compression ignition*

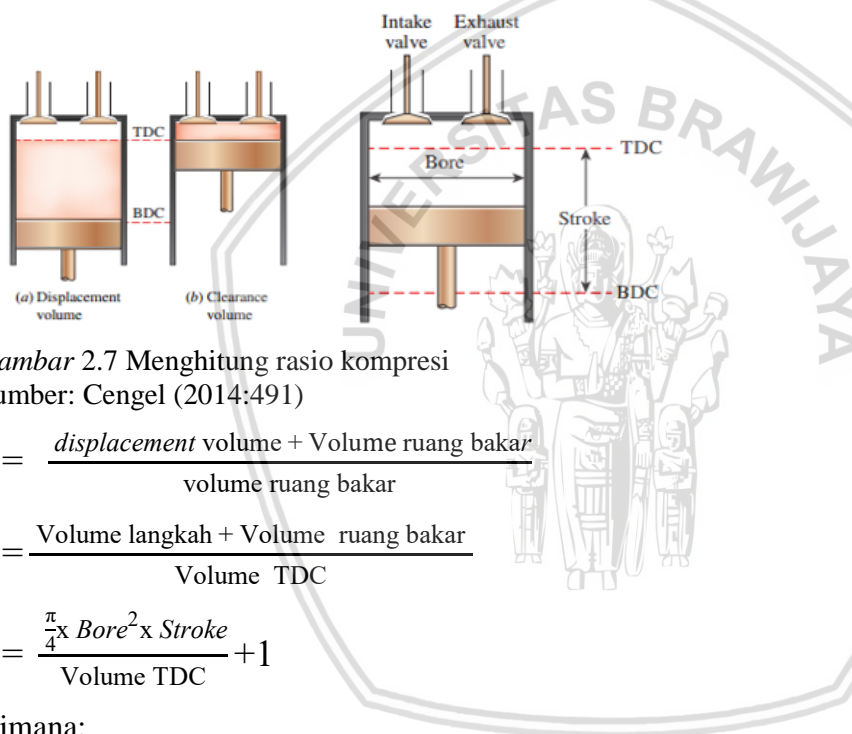
Sumber: Astu P. & Djati N. (2012:95)

1. Tahap Pertama: Periode kelambatan pembakaran (*Ignition Delay*). Pada tahap ini sebagian bahan bakar telah diinjeksikan tetapi belum terbakar. Kelambatan pembakaran dihitung dari mulai injeksi dimana kurva P-θ terpisah dari pengkompresian udara. Kelambatan pembakaran adalah fasa persiapan yang pendek.
2. Tahap Kedua: Pembakaran cepat atau tak terkendali atau rambatan api. Pada tahap kedua ini tekanan naik dengan cepat karena selama periode kelambatan pembakaran *droplet* itu bahan bakar mempunyai waktu untuk menyebar dan mendapatkan udara di sekitarnya. Tahap ini dihitung dari titik akhir tahap kelambatan sampai titik tekanan maksimum dalam diagram indikator. Sekitar sepertiga panas dibebaskan selama periode ini. Campuran bahan bakar dan udara terkompresi terbakar secara cepat sehingga terjadi ledakan kecil dengan seperti itu pula tekanan di dalam silinder meningkat.
3. Tahap Ketiga: Pembakaran terkendali. Pada akhir tahap kedua tekanan dan temperatur sudah sangat tinggi sehingga *droplet* bahan bakar yang diinjeksikan langsung terbakar saat memasuki ruang bakar dan kenaikan tekanan selanjutnya dapat dikendalikan dengan cara mekanik, yaitu dengan laju penginjeksian. Periode ini diasumsikan berakhir pada temperatur maksimum. Panas yang dibebaskan sampai akhir periode ini sekitar 70 sampai 80 persen dari panas total bahan bakar yang disuplai selama siklus.
4. Tahap Keempat: *After Burning*. Tahap ini tidak dapat muncul dalam semua kasus. Secara teoritik diharapkan pembakaran berakhir pada tahapan ketiga. Namun karena miskinnya distribusi partikel bahan bakar, pembakaran berlanjut selama sisa langkah ekspansi. Lama tahap ini sekitar 70 sampai 80 derajat poros engkol dari titik mati atas

dan panas yang dibebaskan sampai akhir semua proses pembakaran adalah sekitar 95-97 persen 3-5 persen dari panas terbuang menjadi bahan bakar yang tak terbakar bersama gas buang.

2.6 Rasio Kompresi

Rasio kompresi adalah nilai numerik volume silinder dibagi nilai numerik volume *cleareance* atau volume ruang bakar. Efisiensi motor sangat dipengaruhi tekanan silinder sebelum pembakaran menurut Arismundar (1993). Seiring dengan meningkatnya rasio kompresi maka efisiensi termal juga ikut meningkat akan tetapi seiring peningkatan rasio kompresi akan menaikkan tekanan maksimum silinder.



Gambar 2.7 Menghitung rasio kompresi

Sumber: Cengel (2014:491)

$$r_c = \frac{\text{displacement volume} + \text{Volume ruang bakar}}{\text{volume ruang bakar}} \quad (2-1)$$

$$r_c = \frac{\text{Volume langkah} + \text{Volume ruang bakar}}{\text{Volume TDC}}$$

$$r_c = \frac{\frac{\pi}{4} \times \text{Bore}^2 \times \text{Stroke}}{\text{Volume TDC}} + 1$$

Dimana:

Bore = Diameter Silinder (mm)

Stroke = Panjang langkah (mm)

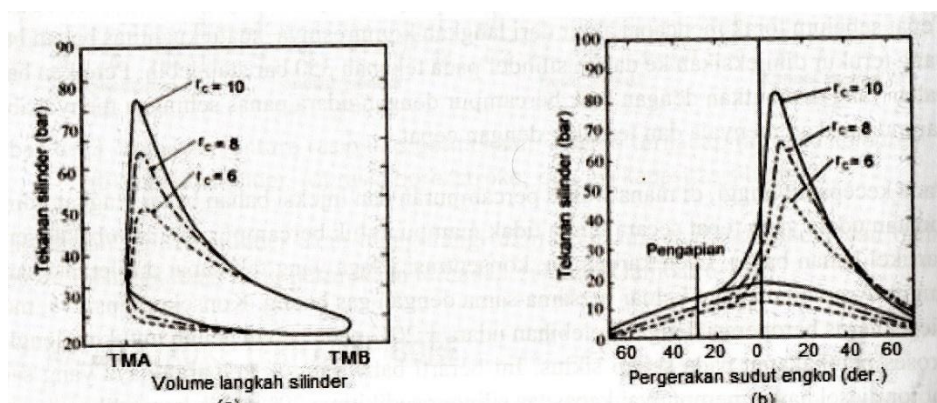
Volume TDC = Volume Ruang Bakar (mm)

Sumber : Cengel (2014)

2.6.1 Pengaruh Rasio Kompresi dan Tekanan Silinder

Seiring dengan meningkatnya rasio kompresi akan mengakibatkan kenaikan tekanan maksimum silinder sehingga menyebabkan kenaikan temperatur silinder. Tekanan silinder yang tinggi menyebabkan meningkatnya temperatur di dalam ruang bakar dengan

peningkatan rasio kompresi yang sama sedemikian gas akhir menjadi panas menyebabkan bahan bakar terbakar secara spontan (Kristanto, 2015).



Gambar 2.8 : Pengaruh rasio kompresi dan tekanan silinder
Sumber: Kristanto (2015:166)

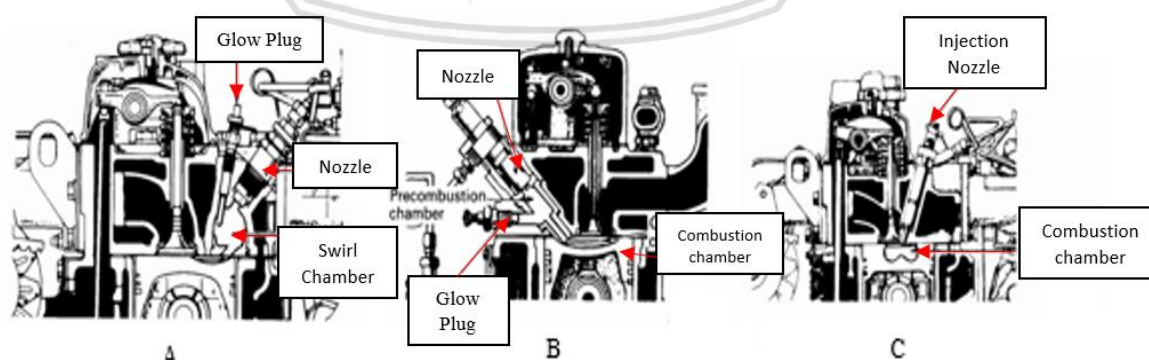
Jika rasio kompresi terlalu besar maka akan menimbulkan ketukan (*knocking*) yang bisa menurunkan daya mesin. Kenaikan rasio kompresi harus diiringi oleh penggunaan bahan bakar solar yang mempunyai angka cetane yang tepat karena akan mempengaruhi daya yang dihasilkan.

2.6.2 Mengubah Rasio Kompresi

Penambahan rasio kompresi akan meningkatkan performa pada mesin akan tetapi harus diiringi dengan kesebandingan nilai *cetane* dan *timing* penyemprotan bahan bakar akan berpengaruh pada reaksi pembakaran. Peningkatan rasio kompresi bisa dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Mengubah bentuk ruang bakar

Bentuk ruang bakar yang semakin kecil volumenya akan meningkatkan rasio kompresi.



Gambar 2.9 (a) Tipe kamar pusar (b) Tipe ruang bakar kamar depan (c) Tipe injeksi langsung
Sumber: Izusu (2000)

2. Mengubah bentuk piston

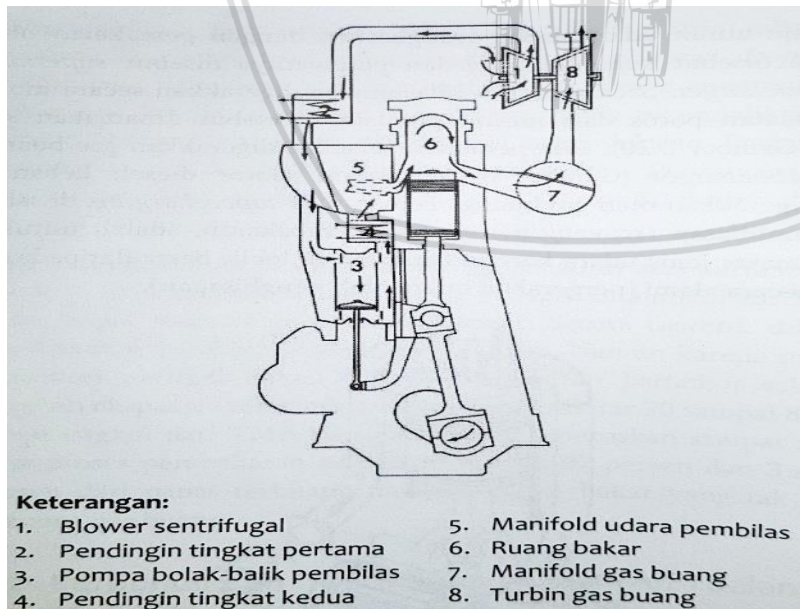
Pada mesin diesel *direct injection* memiliki piston berbentuk mangkuk (*bowl in piston*). Semakin besar luasan mangkuk tersebut akan menurunkan rasio kompresi.



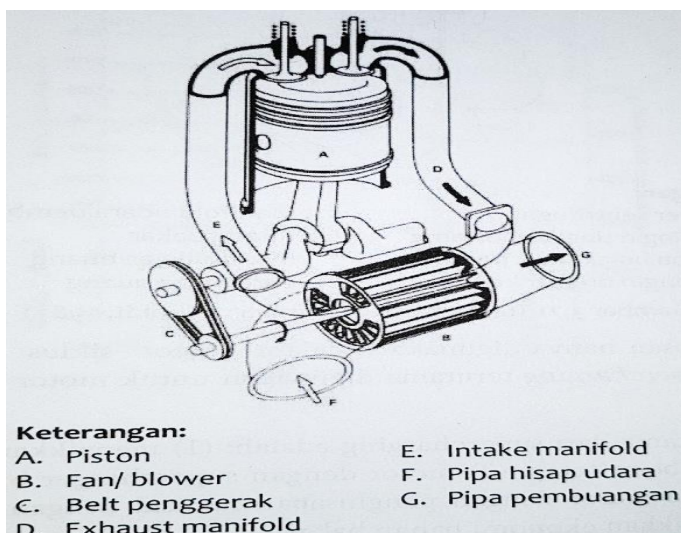
Gambar 2.10 Bentuk piston
Sumber: Zheng Jianjun (2009)

3. Memperbanyak pasokan udara ke ruang bakar

Cara lain agar kompresi mesin bisa meningkat adalah dengan memasok udara lebih banyak ke dalam ruang bakar. Salah satu caranya adalah memasang perangkat *turbocharger* atau *supercharger* pada mesin. Dengan menambah laju aliran udara ke dalam mesin maka bahan bakar akan lebih banyak terbakar secara efisien dan menghasilkan tenaga yang lebih besar. Laju aliran udara dapat ditingkatkan dengan pemakaian blower. Secara umum bila blower digerakkan secara mekanik oleh peralatan poros dari mesin, peralatan tersebut dinamakan *supercharger*. Apabila peralatan tersebut digerakkan oleh gas buang maka disebut *turbocharger*. Dalam mesin diesel, kebanyakan blower digerakkan oleh gas buang.



Gambar 2.11 Turbocharger mesin diesel
Sumber: Astu & Djati (2012:98)



Keterangan:

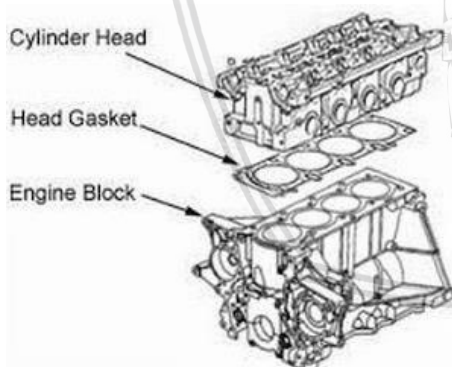
- | | |
|---------------------|---------------------|
| A. Piston | E. Intake manifold |
| B. Fan/ blower | F. Pipa hisap udara |
| C. Belt penggerak | G. Pipa pembuangan |
| D. Exhaust manifold | |

Gambar 2.12 Supercharger mesin diesel

Sumber: Astu & Djati (2012:97)

4. Mengubah head gasket

Head gasket adalah pelapis (*gasket*) yang terletak diantara *engine block* dan *cylinder head* dalam ruang pembakaran mesin. Kegunaan *head gasket* ini adalah untuk mencegah kebocoran gas akibat tekanan dari kompresi dan pembakaran dan juga untuk mencegah masuknya atau merembesnya oli mesin atau cairan *coolant* kedalam silinder-silinder. Akan tetapi, *head gasket* dapat mempengaruhi rasio kompresi karena memiliki ketebalan sehingga ketebalan *head gasket* juga mempengaruhi volume ruang bakar.

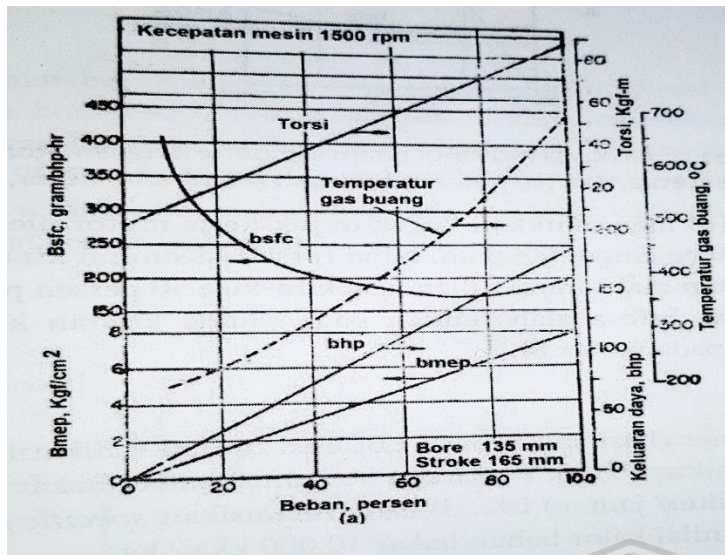


Gambar 2.13 Head gasket

Sumber: Basuki (2014)

2.7 Unjuk Kerja Mesin Diesel

Unjuk kerja mesin diesel bisa dilihat dengan menguji mesin tersebut pada putaran tetap maupun pada putaran berubah. Bmep (*brake mean effective pressure*), bhp (*brake horse power*) dan torsi naik berbanding langsung terhadap beban seperti ditunjukkan Gambar 2.14. Kurva bhp dan bmep selalu meningkat dan hanya dibatasi oleh asap. Temperatur gas buang juga hampir sebanding dengan beban. Bsfc (*brake specific fuel consumption*) terendah dan efisiensi maksimum terjadi kira-kira pada 80 persen beban penuh.



Gambar 2.14 Grafik unjuk kerja mesin diesel
Sumber: Astu & Djati (2012:99)

2.8 Masalah Yang Terjadi Pada Pembakaran

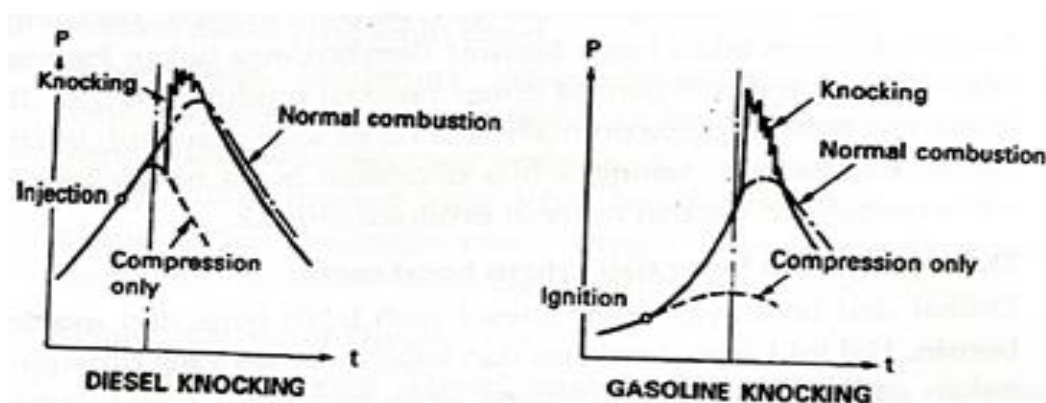
2.8.1 Pengapian Dini (*Pre Ignition*)

Pre Ignition adalah pembakaran tidak normal yang terjadi di ruang bakar sehingga bahan bakar terbakar dengan sendirinya tanpa membutuhkan pemantik atau pemicu lain di dalam silinder. Hal ini dikarenakan pada mesin diesel rasio kompresi sangat tinggi sehingga temperatur naik diatas *self ignition temperature* (SIT) atau temperatur penyalan.

Beberapa faktor yang mempengaruhi SIT adalah temperatur, tekanan, rasio bahan bakar-udara dan lain-lain. Untuk mencegah hal ini maka bisa dilakukan dengan mengurangi temperatur awal pembakaran atau dengan mengatur *injection timing* supaya lebih lambat.

2.8.2 Detonasi atau *Knocking*

Knocking sering disebut dengan istilah detonasi pada mesin. Hal ini akan berdampak terjadinya getaran pada mesin. *Knocking* juga menimbulkan suara berisik pada mesin. Dampaknya secara berkepanjangan *knocking* bisa menyebabkan kerusakan pada komponen-komponen mesin. Detonasi dihasilkan dari perambatan tekanan gas dengan kecepatan tinggi yang dipantulkan dari dinding-dinding ruang bakar sehingga menghasilkan suatu bunyi pukulan logam (Kristanto, 2015). Penyebab detonasi mesin diesel biasanya dikarenakan oleh rasio kompresi terlalu tinggi, nilai *cetane* terlalu rendah dan sistem pendinginan yang tidak memadai.



Gambar 2.15 Knocking

Sumber: Rabiman (2011:11)

Metode yang bisa digunakan untuk mengatasi *diesel knock* adalah :

1. Menggunakan bahan bakar dengan *cetane number* yang tinggi
2. Meningkatkan temperatur udara dan tekanan saat mulai injeksi
3. Mengurangi volume injeksi saat akan menginjeksikan bahan bakar
4. Menaikkan temperatur ruang bakar

2.9 Bahan Bakar Mesin Diesel dan Biodiesel

2.9.1 Bahan Bakar Mesin Diesel

Bahan bakar adalah segala sesuatu atau materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Biasanya bahan bakar mengandung energi panas yang bisa dilepaskan dan dikonversikan. Bahan bakar yang sering digunakan manusia biasanya mengalami proses pembakaran (reaksi redoks) yang mana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah bereaksi dengan udara (oksigen). Jenis bahan yang seringkali digunakan manusia adalah hidrokarbon. Hidrokarbon itu sendiri adalah sebuah senyawa yang terdiri dari unsur atom karbon (C) dan atom hidrogen (H). setiap hidrokarbon memiliki rantai karbon dan atom-atom hidrogen yang saling berikatan dengan rantai karbon. Kandungan lain yang terdapat di dalam bahan bakar seperti nitrogen (N), Sulfur (S), oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Kualitas bahan bakar mesin kompresi bisa diukur dengan angka *cetane*. Angka dari 0 sampai 100 ini merupakan salah satu faktor terukur yang menunjukkan karakteristik dan kualitas bahan bakar (solar). Umumnya, semakin tinggi angka *cetane*, maka semakin tinggi pula kualitas bahan bakar (solar). Nilai *cetane* dari kebanyakan bahan bakar diesel berkisar antara 30-60 (Wardana, 2008).

Solar adalah bahan bakar yang terbuat dari hasil pemanasan minyak bumi dengan temperatur sekitar $250-340^{\circ}C$ yang digunakan untuk bahan bakar diesel. Umumnya, solar

mengandung sulfur dengan kadar yang cukup tinggi. Saat ini, Pertamina sudah memproduksi minyak solar ramah lingkungan dengan merek dagang Pertamina DEX (*Diesel Environment Extra*). Angka *cetane* DEX sekitar 53 dibandingkan dengan produk solar yang ada di pasaran sekitar 48. Sifat utama dari bahan bakar diesel atau solar adalah:

1. Berwarna kuning kecoklatan jernih dan berbau
2. Memiliki titik nyala yang tinggi (40-100°C)
3. Mempunyai berat jenis 0,82-0,86
4. Menghasilkan panas yang besar (± 10.500)
5. Memiliki kandungan belerang yang lebih tinggi daripada bensin
6. Mempunyai rantai Hidrokarbon $C_{14}-C_{18}$ (alkana)

Tabel 2.1
Karakteristik Minyak Solar

| No. | Karakteristik | Satuan | Batasan | | Metode Uji ASTM/Lain | |
|-----|----------------------------|----------------------|-----------------|---------|----------------------|----|
| | | | MIN | MAX | ASTM | IP |
| 1 | Angka Setana | - | 45 | - | D-613 | |
| 2 | Indeks Setana | - | 48 | - | D4737 | |
| 3 | Berat Jenis pada 15°C | Kg/m ³ | 815 | 870 | D-1298/D-4737 | |
| 4 | Viskositas pada 40°C | mm ² /sec | 2 | 5 | D-445 | |
| 5 | Kandungan Sulfur | % m/m | - | 0.35 | D-1552 | |
| 6 | Distilasi : T95 | °C | - | 370 | D-86 | |
| 7 | Titik Nyala | °C | 60 | - | D-93 | |
| 8 | Titik Tuang | °C | - | 18 | D-97 | |
| 9 | Karbon Residu | merit | - | Kelas I | D-4530 | |
| 10 | Kandungan Air | Mg/kg | - | 500 | D-1744 | |
| 11 | <i>Biological Growth</i> | | Nihil | | | |
| 12 | Kandungan FAME | % v/v | - | 10 | | |
| 13 | Kandungan Metanol & Etanol | % v/v | Tak Terdeteksi | | D-4815 | |
| 14 | Korosi Bilah Tembaga | merit | | Kelas I | D-130 | |
| 15 | Kandungan Abu | % m/m | - | 0.01 | D-482 | |
| 16 | Kandungan Sedimen | % m/m | - | 0.01 | D-473 | |
| 17 | Bilangan Asam Kuat | mgKOH/gr | - | 0 | D-664 | |
| 18 | Bilangan Asam Total | mgKOH/gr | - | 0.6 | D-664 | |
| 19 | Partikulat | Mg/l | | | D-2276 | |
| 20 | Penampilan Visual | | Jernih & Terang | | | |
| 21 | Warna | No. ASTM | - | 3 | D-1500 | |

Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi (2006)

Spesifikasi bahan bakar diesel yang digunakan di *European Union* hampir sama, tapi memiliki perbedaan. Seperti angka minimum *cetane* di Eropa lebih tinggi dan terdapat

densitas yang dibutuhkan. Standar bahan bakar diesel ini dikembangkan oleh *European Standards Organization* (CEN), sebagaimana yang bisa dilihat di Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Spesifikasi Bahan Bakar Diesel Yang Dibutuhkan

| <i>Diesel Specification Parameter</i> | <i>Units</i> | <i>Limits</i> | <i>Test Method</i> |
|---|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| <i>Cetane Number</i> | - | 51 minimum | EN ISO 5165 |
| <i>Cetane Index</i> | - | 46 minimum | EN ISO 4624 |
| <i>Density at 15°C</i> | kg/m ³ | 820 min. to 845 max | EN ISO 3675 EN ISO 12185 |
| <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i> | % (m/m) | 11 maximum | EN 12916 |
| <i>Sulfur Content</i> | mg/kg | 50 maximum | EN ISO 20846 |
| | | 10 maximum | EN ISO 20847 |
| | | | EN ISO 20884 |
| <i>Flash Point</i> | °C | >55 | EN ISO 2719 |
| <i>Carbon Residue (on 10% Dist. Residue)</i> | % (m/m) | 0.3 maximum | EN ISO 10370 |
| <i>Ash Content</i> | % (m/m) | 0.01 maximum | EN ISO 6245 |
| <i>Water Content</i> | mg/kg | 200 maximum | EN ISO 12937 |
| <i>Total Contamination</i> | mg/kg | 24 maximum | EN 12662 |
| <i>Copper Strip Corrosion (3 Hours at 50°C)</i> | - | class 1 | EN ISO 2160 |
| <i>Oxidation Stability</i> | g/m ³ | 25 maximum | EN ISO 12205 |
| <i>Lubricity, WSD at 60°C</i> | µm | 460 maximum | EN ISO 12156-1 |
| <i>Viscosity at 40°C</i> | mm ² /sec | 2 min. to 4,5 max. | EN ISO 3104 |
| <i>Distillation</i> | | | EN ISO 3405 |
| <i>Vol. Recovered at:</i> | | | |
| 250°C | % (V/V) | <65 | |
| 350°C | % (V/V) | 85 minimum | |
| 95% Point | °C | 360 maximum | |
| <i>Fatty Acid Methyl Esters (FAME) Content</i> | % (V/V) | 5 maximum | EN 14078 |

Sumber: Chevron (2005)

2.9.2 Bahan Bakar Biodiesel (*Castor Oil*)

Biodiesel merupakan bioenergi atau bahan bakar nabati yang dibuat dari minyak nabati tumbuhan alami yang banyak tumbuh di Indonesia seperti kelapa sawit, kemiri, jarak, nyamplung, kacang tanah dan lainnya. Dalam penelitian ini bahan bakar nabati berasal dari minyak jarak kepyar (*castor oil*) dan telah melewati beberapa proses seperti ekstraksi, transesterifikasi sehingga diperoleh metil ester (biodiesel), kemudian biodiesel tersebut dicampur dengan bahan bakar diesel (solar). Beberapa keuntungan menggunakan biodiesel adalah:

1. Ketersediaan akan bahan bakunya terjamin
2. Mempunyai efisiensi pembakaran yang lebih baik dibanding solar
3. Bisa diproduksi secara lokal
4. Mengurangi emisi gas buang
5. Mengurangi tingkat ketebalan atau opasitas asap
6. Memiliki angka *cetane* yang cukup tinggi
7. Mengurangi pemanasan global dan pencemaran lingkungan
8. Membantu mengurangi impor bahan bakar minyak

Castor oil adalah minyak yang didapatkan dari tanaman pohon jarak (*Ricinus communis*). Di Indonesia minyak ini sering disebut sebagai minyak Kastrol. Minyak *castor* mengandung asam lemak jenuh sebesar 2,68% dan asam lemak tak jenuh sekitar 97,44%. Kandungan asam lemak terbesar adalah asam lemak ricinoleat sekitar 89,3% massa. Asam lemak lainnya dalam *castor oil* adalah asam lemak linoleat 4,2 %, asam lemak oleat 2,3%, asam lemak stearat 1%, asam lemak palmitat 1%, asam lemak dihidroksistearat 1%, asam lemak linolenat 0,3%, asam lemak densipolat 0,93%, dan asam lemak eicosanoat 0,3%. Minyak *castor* dapat dijadikan biodiesel melalui proses transesterifikasi sebagaimana yang dikemukakan oleh Arif Budiman (2017:19). Pembuatan biodiesel dari minyak *castor* dalam skala industri umumnya memakai katalis asam. Reaksi transesterifikasi menggunakan katalis asam memiliki kelebihan yaitu hasil dari katalis tidak begitu dipengaruhi oleh asam lemak bebas dan bisa bekerja pada reaksi transesterifikasi dan esterifikasi secara simultan.

Tabel 2.3
Properties Minyak *Castor*
 Sumber: Ozcanli (2014)

Tabel 2.4

| <i>Properties</i> | D | B5 | B10 | B25 | B50 | COME | TEST METHOD |
|--|----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|--------------------|
| <i>Density</i> (g/cm ³) | 0.289 | 0.833 | 0.837 | 0.846 | 8.869 | 0.92 | ASTM D4052 |
| <i>Lower Heating Value</i> (kcal/kg) | 10790 | 10770 | 10612 | 10426 | 9915 | 8983 | ASTM D240 |
| <i>Cetane Number</i> | 54 | 57.3 | 61.8 | 65.5 | 70.9 | 80.2 | ASTM D613 |
| <i>Pour Point</i> (°C) | -18 | -18.8 | -20 | -23.4 | -26.6 | -30 | ASTM D97 |
| <i>Viscosity</i> (cSt) | 2.4 | 2.6 | 2.9 | 3.9 | 7.1 | 11.5 | ASTM D445 |
| <i>Sulphur Content</i> (wt%) | 0.2348 | 0.2279 | 0.177 | 0.1336 | 0.1063 | 0 | ASTM D5453 |
| <i>Copper strip corrosion</i> (50°C 3 Hours) | IB | IB | IB | IB | IB | IB | ASTM D130 |

Standar Karakteristik Biodiesel Indonesia

| No. | Karakteristik | Batasan | Satuan |
|------------|----------------------|----------------|---------------|
|------------|----------------------|----------------|---------------|

| | | Minimal | Maximum | |
|----|--|---------|---------|--------------------|
| 1 | Massa Jenis @ 40°C | 850 | 890 | kg/m ³ |
| 2 | Viskositas Kinematik @40°C | 2.3 | 6 | mm ² /s |
| 3 | Angka Setana | 51 | - | |
| 4 | Titik Nyala | 100 | - | °C |
| 5 | Titik Kabut | - | 18 | °C |
| 6 | Korosi Lempeng Tembaga | Nomor 1 | | |
| 7 | Residu Karbon di: | | | |
| | * dalam percontoh asli, atau | - | 0.05 | % massa |
| | * dalam 10% ampas destilasi | - | 0.3 | |
| 8 | Air & Sedimen | - | 0.05 | % volume |
| 9 | Temperatur Destilasi 90% | - | 360 | °C |
| 10 | Abu Tersulfatkan | - | 0.02 | % massa |
| 11 | Belerang | - | 50 | mg/kg |
| 12 | Fosfor | - | 4 | mg/kg |
| 13 | Angka Asam | - | 0.5 | mg KOH/g |
| 14 | Gliserol Bebas | - | 0.02 | % massa |
| 15 | Gliserol Total | - | 0.24 | % massa |
| 16 | Kadar Ester Metil | 96.5 | - | % massa |
| 17 | Angka Iodium | - | 115 | % massa |
| | Kestabilan Oksidasi | | | |
| 18 | * Periode Induksi Metode Rancimat atau | 480 | | menit |
| | * Periode Induksi Metode Petro Oksi | 36 | | |
| 19 | Monogliserida | - | 0.8 | % massa |

Sumber: Badan Standardisasi Nasional Indonesia SNI 7182 (2015)

2.10 Karakteristik Bahan Bakar

2.10.1 Angka Cetane

Angka *Cetane* adalah suatu indeks yang digunakan pada mesin diesel untuk menunjukkan kualitas bahan bakar diesel saat terjadinya kompresi pengapian. Selain itu angka setana juga digunakan untuk menunjukkan tingkat kepekaan bahan bakar diesel terhadap detonasi. Bahan bakar diesel dengan angka setana yang tinggi akan mudah berdetonasi pada mesin diesel. Dalam beberapa mesin diesel tertentu, bahan bakar dengan setana yang lebih tinggi mempunyai periode penundaan pengapian (*ignition delay*) lebih pendek daripada bahan bakar dengan setana yang lebih rendah. Angka setana ini berbanding terbalik dengan angka oktan yang biasanya terdapat pada motor bensin. Pada motor bensin semakin tinggi nilai oktannya maka bensin tersebut akan sulit untuk dibakar. Sedangkan pada mesin diesel semakin tinggi angka setana pada solarnya maka solar tersebut akan makin mudah untuk terbakar. Jadi semakin tinggi angka setana makin tinggi pula kualitas bahan bakar solar tersebut. Nilai setana ini yang biasanya digunakan sebagai satuan standar dalam

menggambarkan susah tidaknya pembakaran relatif solar dikarenakan setana adalah kandungan yang paling mudah menyala di dalam ruang bakar mesin diesel.

Semakin tinggi nilai setana, maka solar akan mudah terbakar. Implikasi dari hal tersebut adalah bila bahan bakar solar mudah terbakar saat dikompresi, maka ketukan yang terjadi pada saat proses pembakaran mesin diesel akan berkurang sehingga suara mesin akan semakin halus dan mesin diesel bisa menghasilkan tenaga yang maksimal.

2.10.2 Viskositas

Mudah tidaknya aliran fluida mengalir bisa dinyatakan dengan viskositas dinamik dan viskositas kinetik. Viskositas dinamik adalah ukuran resistansi untuk mengalir dari suatu zat fluida, sedangkan viskositas kinetik adalah resistansi zat fluida untuk mengalir karena gaya berat. Viskositas dapat dinyatakan dalam waktu yang dibutuhkan fluida untuk mengalir pada jarak tertentu. Nilai viskositas fluida yang tinggi menunjukkan resistansi aliran fluida untuk bisa mengalir juga tinggi.

Di mesin diesel viskositas sangatlah penting karena erat kaitannya dengan kemudahan solar mengalir pada pemompaan, kemudahan penguapan untuk pengkabutan dan bisa melumasi *fuel pump plungers*. Penggunaan bahan bakar dengan viskositas rendah bisa menyebabkan keausan pada bagian pompa-pompa bahan bakar. Namun apabila bahan bakar memiliki viskositas tinggi akan berakibat kerja pompa dan kerja injektor menjadi berat karena sulit untuk mengalir.

2.10.3 Nilai Kalor Bahan Bakar Minyak

Hampir semua bahan bakar tersusun dari molekul-molekul hidrokarbon dengan konfigurasi atau rantai yang berbeda-beda. Ikatan antar atom hidrokarbon ataupun non-hidrokarbon masing-masing menyimpan sebuah energi. Energi yang terdapat dalam ikatan antar atom inilah yang sering disebut dengan energi kimia. Apabila ikatan antar atom tersebut terlepas atau putus, energi yang tersimpan didalamnya juga akan terlepas dalam bentuk panas. Jumlah energi panas yang terlepas untuk setiap satu satuan massa bahan bakar inilah yang sering disebut nilai kalor bahan bakar atau *heating value*. Selain melepas energi panas. Putusnya ikatan antar atom diikuti juga dengan reaksi oksidasi, yang ditandai dengan terikatnya atom oksigen (udara) dengan masing-masing atom karbon dan hidrogen yang menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O).

Nilai *heating value* bisa diukur dengan menggunakan *bomb calorimeter*. Alat ini terdiri atas sebuah ruang bakar dengan volume tetap sebagai tempat spesiman bahan bakar yang

akan diukur nilai kalornya. Ruang bakar ini dikelilingi dengan air sebagai media pengukurnya saat terjadi perubahan temperatur saat proses pembakaran. Sehingga saat proses pembakaran akan menghasilkan panas yang mengakibatkan kenaikan temperatur ruang. Kenaikan temperatur tersebut akan memanaskan air disekitarnya, sehingga diperoleh temperatur sebelum proses pembakaran dan sesudah pembakaran. Dari temperatur air itulah akan dihitung nilai kalor bahan bakar tersebut.

Ada dua jenis *heating value* yang digunakan secara umum yaitu *higher heating value* (HHV) dan *lower heating value* (LHV). *Higher heating value* (HHV) adalah nilai pembakaran bila didalam gas hasil pembakaran terdapat H₂O berwujud cairan sedangkan *lower heating value* (LHV) adalah nilai pembakaran bila didalam gas hasil proses pembakaran terdapat H₂O berbentuk gas.

2.10.4 Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Specific Gravity (SG) merupakan perbandingan densitas sebuah fluida terhadap fluida standar pada suhu yang sama atau suhu yang berbeda. Oleh karena itu, SG dinyatakan dengan dua angka suhu. Angka yang pertama menunjukkan suhu zat fluida, sedangkan angka kedua menunjukkan suhu air contohnya 20/4 °C dan 60/60 °F. Standar pengukurannya menggunakan °API *gravity*. Indikasi mutu bahan bakar bisa diperoleh dari °API *gravity* dan berat jenisnya. Salah satu alat untuk menentukan *specific gravity* adalah *hydrometer* dimana SG bisa terbaca langsung di alat tersebut.

2.10.5 Titik Nyala (*Flash Point*)

Temperatur *flash point* adalah temperatur dimana bahan bakar akan menghasilkan api atau terbakar jika dikenai api. Akan tetapi, kondisi tersebut hanya berlangsung beberapa saat saja. Setelah api menyala, maka api akan segera mati tidak lama setelahnya. *Flash point* merupakan faktor penting untuk keamanan atau mencegah terjadinya kebakaran.

2.10.6 Kandungan Belerang (*Sulphur Content*)

Belerang terdapat di dalam semua bahan bakar minyak dalam jumlah yang sangat sedikit. Walaupun demikian, dikarenakan belerang memiliki sifat yang merusak, maka pembatasan kadar belerang sangat diperlukan di dalam spesifikasi bahan bakar minyak. Jika belerang teroksidasi dengan oksigen saat pembakaran akan terbentuk belerang oksida (SO₂) dan apabila SO₂ terjadi kontak dengan air akan menimbulkan korosi di logam hal ini tentu sangat merugikan. Sehingga kadar belerang sangat penting untuk bahan bakar minyak.

2.10.7 Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang merupakan suhu terendah suatu minyak yang mana minyak tersebut kondisinya masih mengalir karena beratnya sendiri. Seringkali bahan bakar minyak masih dapat dipompa, meskipun suhunya sudah dibawah titik tuangnya. Titik tuang ini diperlukan sehubungan dengan keadaan penimbunan dan pemakaian bahan bakar minyak tersebut.

2.10.8 Kadar Abu (*Ash*)

Kadar abu adalah residu dari bahan bakar minyak yang tidak bisa dibakar atau sisa-sisa bahan bakar. Komponen mesin bisa mengalami keausan karena sifat *abrassiveness* dari abu.

2.10.9 Ignition Quality

Merupakan suatu kemampuan bahan bakar untuk mudah dinyalakan. Minyak solar bisa memberikan kerja mesin yang maksimal apabila menghasilkan pembakaran sempurna di ruang bakar. Pembakaran sempurna bisa dilakukan dengan menginjeksikan bahan bakar (dalam bentuk kabut) ke ruang bakar yang di dalamnya sudah terdapat udara panas terkompresi sehingga mampu menyalakan ruang bakar. Jeda waktu antara bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar sampai saat terbakar disebut waktu tunda (*delay period*), dalam satuan menit. *Delay period* yang panjang atau lama akan mengakibatkan terakumulasinya bahan bakar yang banyak, sehingga akan terjadi penyalan spontan dan menimbulkan kenaikan tekanan mendadak dan berdampak ledakan yang keras pada ruang bakar. Hal inilah yang disebut dengan *Diesel Knock*. Minyak solar yang *ignition quality*nya rendah akan memiliki *delay period* yang lebih panjang atau lama.

2.11 Proses Pembakaran

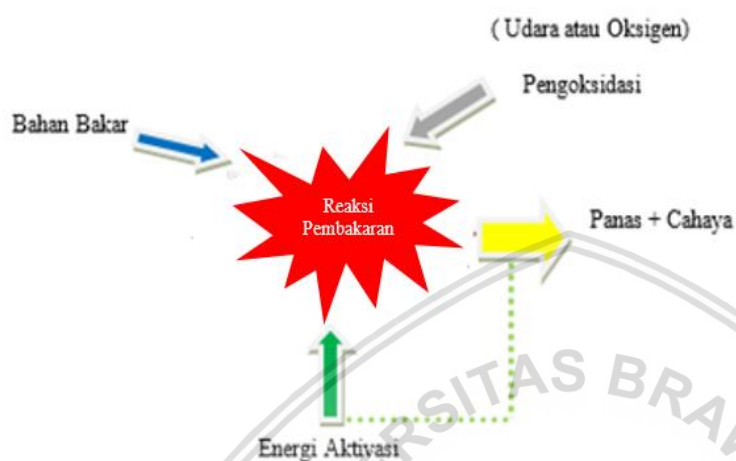
Pembakaran merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dengan pengoksidasian oksigen (Oksigen dan udara) yang menghasilkan panas dan cahaya (Wardana, 2008).

Supaya bahan bakar bisa terbakar secara efisien di dalam ruang bakar maka:

1. Campuran oksigen yang cukup untuk membakar semua bahan bakar (oksigen berasal dari udara yang masuk melalui *inlet manifold* ke dalam silinder)
2. Bahan bakar dipecah ke butiran-butiran kecil atau dikabutkan sehingga mudah bercampur dengan oksigen

3. Bunga api atau temperatur yang cukup tinggi sebagai aktivator sehingga campuran bahan bakar dan udara bisa terbakar. Pada motor diesel menggunakan temperatur yang tinggi untuk menyulut bahan bakar.

Apabila salah satu syarat diatas tidak terpenuhi, maka bahan tidak akan terbakar sehingga proses pembakaran tidak terjadi.



Gambar 2.16 Combustion process

Sumber: Wardana (2008:3)

Contoh reaksi pembakaran (*hexadecane*) adalah sebagai berikut :



Sumber : Wardana (2008)

2.12 Karakteristik Kinerja Motor Bakar

2.12.1 Torsi

Torsi merupakan kemampuan atau tenaga yang diberikan terhadap suatu benda, sehingga menyebabkan benda tersebut bisa berputar. Besarnya torsi tergantung pada gaya yang dihasilkan dan jarak antara sumbu putaran dan letak gaya tersebut. Pada saat proses pembakaran akan menghasilkan tekanan yang menggerakkan piston. Tekanan tersebut kemudian disalurkan oleh *connecting rod* dan selanjutnya dikonversikan *crank shaft* dari gerak translasi menjadi gerak rotasi. Putaran *crank shaft* ini akan menghasilkan gaya yang disebut dengan momen putar. Berubahnya jarak horizontal ketika *crankshaft* berputar maka akan mengubah pula nilai torsi.

Torsi bisa diukur dengan menggunakan sebuah alat bernama *dynamometer*. Persamaan torsi dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$T = F \times l$$

(2-2)

dengan:

T = Torsi (kgf·m)

F = Besarnya Gaya Putar Yang Terbaca Pada *Dynamometer* (kgf)

l = Panjang Lengan *Dynamometer* (m)

Sumber : Arismunandar (1993)

2.12.2 Daya Efektif

Daya efektif merupakan daya yang didapatkan dari poros mesin atau disebut sebagai daya poros yang digunakan untuk mengatasi beban sebuah kendaraan. Daya efektif didapatkan dari pengukuran torsi pada poros yang dikalikan dengan kecepatan sudut putarnya atau dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$N_e = T \cdot \omega = \frac{T \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot 75} = \frac{T \cdot n}{716,5} \quad (2-3)$$

dengan:

N_e = Daya Efektif (PS)

T = Torsi (kgf.m)

ω = Kecepatan Anguler pada Poros (rad·detik⁻¹)

n = Putaran Poros (rpm)

Sumber : Arismunandar (1993)

2.12.3 Specific Fuel Consumption (SFC_e)

Laju konsumsi bahan bakar spesifik efektif adalah jumlah bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya efektif selama satu jam. Nilai SFC_e dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$SFC_e = \frac{F_c}{N_e} = \frac{Q \cdot \rho \cdot \frac{3600}{1000}}{N_e} \quad (2-4)$$

dengan:

SFC_e = Laju Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (kg/PS.jam)

Q = Debit bahan bakar minyak (ml)

ρ = massa jenis bahan bakar minyak (gr/ml)

FC = Konsumsi bahan bakar tiap jam (kg/jam)

N_e = Daya Efektif (PS)

Sumber : Arismunandar (1993)

2.12.4 Efisiensi Termal Efektif (η_e)

Efisiensi termal efektif merupakan perbandingan antara daya poros atau daya efektif dengan laju kalor masuknya. Efisiensi ini dihitung untuk mengetahui nilai ekonomis penggunaan bahan bakar dalam menghasilkan daya. Persamaannya bisa ditunjukkan sebagai berikut.

$$\eta_{te} = \frac{632 \cdot N_e}{F_c \cdot LHV_{bb}} \times 100\% = \frac{632}{F_c / N_e \cdot LHV_{bb}} \times 100\% = \frac{632}{SFC_e \cdot LHV_{bb}} \times 100\% \quad (2-5)$$

dengan:

Q_e = Panas hasil pembakaran yang diubah menjadi daya poros (kcal/jam)

η_e = Efisiensi termal efektif (%)

LHV_{bb} = Nilai kalor dari bahan bakar minyak (kcal/kg)

Q_b = Panas hasil proses pembakaran (kcal/jam)

Sumber : Arismunandar (1993)

2.13 Hipotesis

Seiring dengan meningkatnya *compression ratio* pada mesin diesel, mengakibatkan tekanan dalam ruang bakar juga semakin meningkat. Faktor ini yang bisa meningkatkan performa mesin diesel. Oleh sebab itu dengan meningkatnya rasio kompresi mesin bisa membantu memperbaiki karakteristik biodiesel *castor oil* dimana viskositasnya yang tinggi dan nilai kalornya rendah sehingga performa yang dihasilkan bisa menyamai atau melebihi performa solar biasa.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang dipakai dalam penelitian kali ini adalah metode penelitian eksperimental sesungguhnya atau *True Experimental Research*. Dimana metode ini berfokus kepada satu atau lebih variabel proses tertentu. Pengujian ini dilakukan dengan cara pengamatan langsung untuk mengetahui mencari sebab akibat pengaruh rasio kompresi terhadap performa mesin dengan penambahan biodiesel minyak jarak (*castor oil*) pada solar yang dilakukan pada mesin diesel.

3.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa variabel yaitu sebagai berikut :

1. Variabel Bebas

Variabel ini adalah variabel yang mempengaruhi penelitian, yaitu beberapa faktor yang dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungan yang diobservasi yaitu:

- a. Campuran biodiesel-solar dengan kadar konsentrasi biodiesel (*castor oil*) sebanyak 10%, 20% dan 30%
- b. Variasi rasio kompresi mesin 15.5, 17.5 dan 19.5
- c. Putaran mesin diesel kisaran 1800 sampai 3000 rpm dengan interval 300 rpm

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang tergantung atau hasil dari variabel bebas. Variabel ini memiliki hasil yang berbeda tergantung dari variabel bebasnya. Variabel terikat pada penelitian ini adalah:

- a. Torsi yang dihasilkan oleh mesin diesel
- b. Daya yang dihasilkan mesin diesel
- c. Laju Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (*Specific Fuel Consumption Effective*)
- d. Efisiensi Termal Efektif (*Thermal Effective Efficiency*)

3. Variabel Terkontrol

Variabel ini adalah variabel yang dibuat tetap atau dikendalikan oleh peneliti sehingga hubungan antara variabel bebas dan terikat tidak terpengaruh. Variabel terkontrol pada penelitian kali ini adalah :

- Temperatur bahan bakar yang dianggap konstan saat pengujian data
- Pembebanan pada *dynamometer* dianggap konstan
- Timing Injection* keadaan standar yaitu 17° BTDC (*Before Top Dead Center*)
- Tidak adanya kebocoran pada selang bahan bakar

3.3 Waktu dan Pelaksanaan Penelitian

Waktu : Maret 2018 – Mei 2018

Tempat : Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3.4 Instalasi dan Alat Penelitian yang Digunakan

Pada penelitian ini, peneliti menggunakan berbagai alat dan rangkaian *engine* yang terdiri dari:

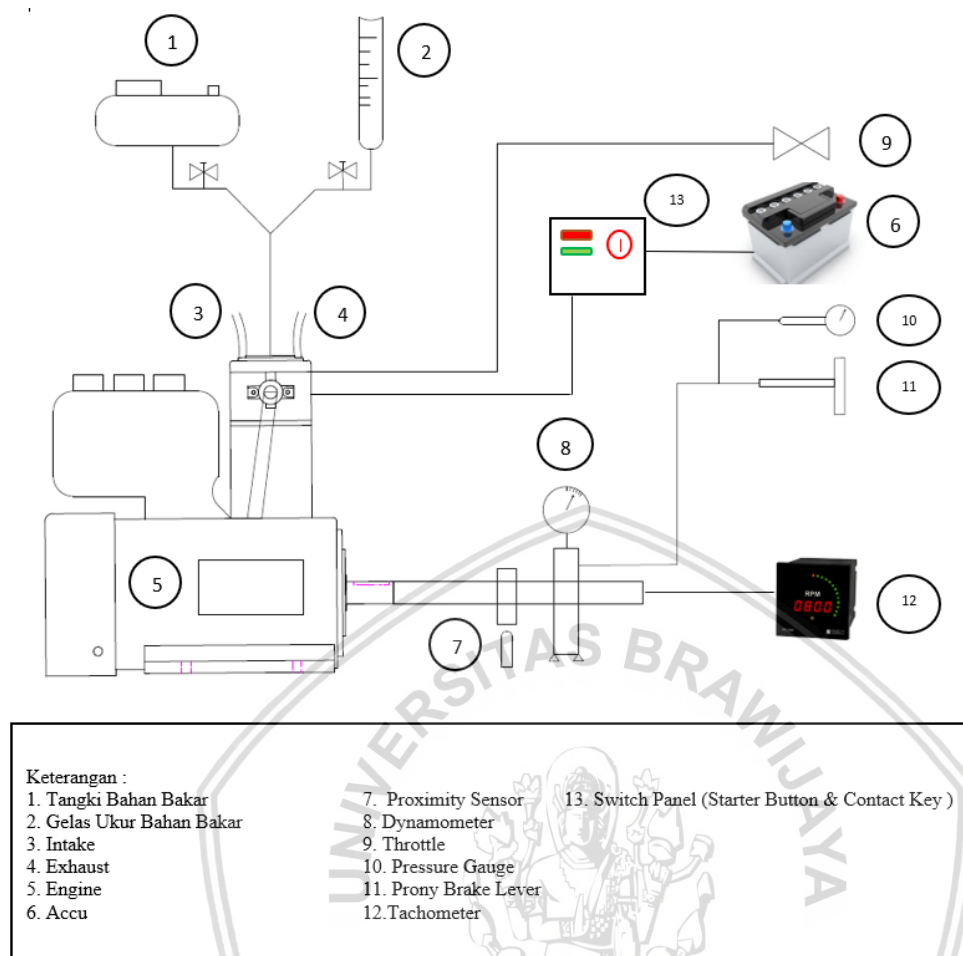
- 1 unit mesin diesel Yanmar L70N
- Berbagai alat dan instrumen pengukuran yang diperlukan
- Perlengkapan kelistrikan seperti kabel, *fuse*, saklar dan sebagainya
- Perlengkapan mesin seperti selang bahan bakar, jirigen bahan bakar, *exhaust* dan sebagainya

Spesifikasi dari mesin diesel yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

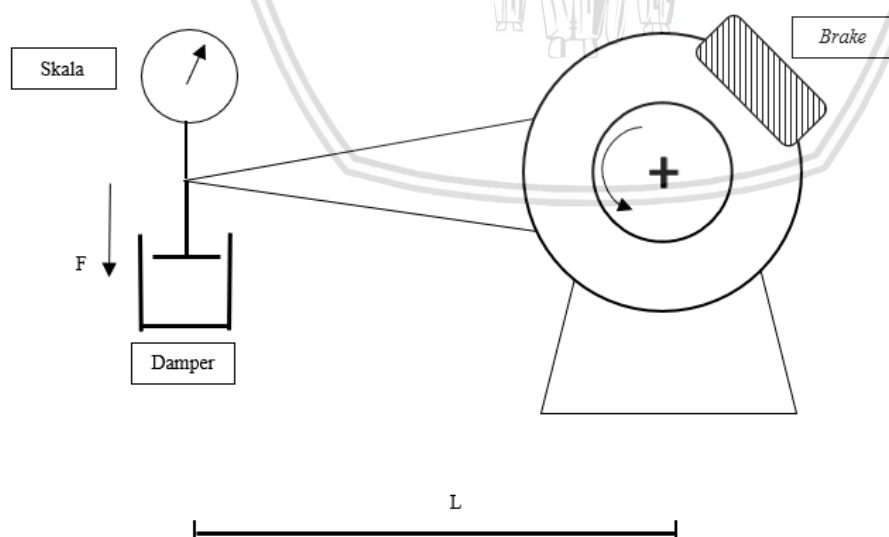
Tabel 3.1
Spesifikasi *Diesel Engine* YANMAR LN 70D

| | |
|-----------------------------------|--|
| Tipe | 1 Silinder, Vertikal, 4 cycle, air cooled engine |
| Sistem Pembakaran | DI System (<i>Direct Injection</i>) |
| <i>Starting system</i> | <i>Electric Dynamo Motor Starter</i> |
| Volume Silinder | 300 cc |
| <i>Bore x Stroke</i> | 78 mm x 67 mm |
| Perbandingan kompresi | 17.5 |
| Bahan bakar | Solar/diesel |
| Pendingin | <i>Forced air cooling with flywheel fan</i> |
| <i>Lubricating oil</i> /Pelumasan | SAE 15W – 30 or higher |
| <i>Lubricating oil capacity</i> | 1,15 liter |
| Daya poros | 4,9 kW (6,7 HP) / 3600 rpm |
| Merk | Yanmar, Italy S.p.A. |
| Model | L70N6 : METMYI |

Sumber: *Manual Book Yanmar LN 70D*



Gambar 3.1 Skema instalasi mesin diesel
Sumber : Dokumentasi Pribadi (2018)



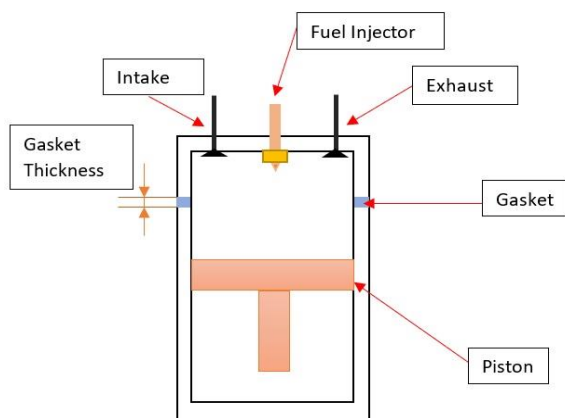
Gambar 3.2 Prinsip kerja dynamometer
Sumber : Dokumentasi Pribadi (2018)

Gambar 3.1 menunjukkan skema instalasi dari motor diesel yang dipakai saat penelitian. Pada penelitian kali ini digunakan mesin diesel 4 langkah *direct injection* 1 silinder yang berkapasitas sekitar 300 cc. Mesin ini memiliki spesifikasi sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Langkah-langkah pengambilan data dilakukan berdasarkan skema instalasi tersebut.

Pertama memastikan bahan bakar terisi pada tangki (1) dan pada gelas ukur (2). Kemudian memeriksa kondisi *accu* (6) untuk memastikan bahwa voltase bisa untuk menghidupi mesin atau *starter*. Lalu memposisikan *Contact Key* dalam posisi *on*. Selanjutnya menekan *starter button* (13) dan membuka bukaan *throttle* (9) supaya bahan bakar bisa masuk ke dalam pompa injeksi dan selanjutnya diinjeksikan ke dalam ruang bakar. Kemudian saat *engine* (5) telah hidup, dibiarkan beberapa saat, lalu mengatur putaran poros sesuai kondisi yang diinginkan. Putaran poros ditunjukkan pada *tachometer* (12) yang didapatkan dari hasil pembacaan *proximity sensor* (7) yang dipasang pada poros. Untuk mengetahui konsumsi bahan bakar bisa diperoleh dengan menggunakan gelas ukur bahan bakar (2). Tutup katup dari tangki (1) dan buka katup dari gelas ukur (2) dalam waktu tertentu untuk mengetahui konsumsi bahan bakar mesin. Untuk mengetahui torsi seperti pada Gambar 3.2, digunakan neraca pada *dynamometer* (8) dengan mengatur tekanan *prony brake* yang dijaga konstan dengan cara memutar *prony brake lever* (11). Dalam persiapan sebelum pengujian kita juga harus menyiapkan modifikasi rasio kompresi dan campuran bahan bakar biodiesel-solar yang akan dijelaskan berikut ini.

3.4.1 Modifikasi Gasket

Mesin diesel yang digunakan adalah blok mesin yang mempunyai satu silinder dengan geometri standar silinder pada Tabel 3.2.



Gambar 3.3 Skema ruang silinder
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

Pada pengujian kali ini untuk memodifikasi rasio kompresi mesin dapat dilakukan dengan mengubah volume ruang bakar mesin yang terdapat diantara *cylinder block* dan *cylinder head* yang dimana semakin tebal gasketnya maka volume ruang bakar semakin meningkat sehingga rasio kompresi menjadi turun. Contoh perhitungan rasio kompresi sebagai berikut.

Tabel 3.2
Geometri Mesin Diesel YANMAR

| Geometri Mesin Diesel Yanmar | |
|---|-------------------------|
| Diameter piston (<i>Bore</i>) | 7,8 cm |
| Langkah piston (<i>Stroke</i>) | 6,2 cm |
| Volume silinder (<i>Displacement</i>) | 296,258 cm ³ |
| Perbandingan Kompresi | 17,5 : 1 |
| Tebal gasket | 0,90 mm |

Untuk mengetahui volume ruang bakar, maka dapat digunakan persamaan 2-1 untuk contoh perhitungan ini.

$$r_c = \frac{\frac{\pi}{4} \times Bore^2 \times Stroke}{Volume\ TDC} + 1$$

$$17,5 = \frac{\frac{\pi}{4} \times 7,8^2 \times 6,2}{296,25\ cm^3} + 1$$

$$16,5 = \frac{\frac{\pi}{4} \times 7,8^2 \times 6,2}{296,25\ cm^3}$$

$$V_{TDC} = \frac{\frac{\pi}{4} \times 7,8^2 \times 6,2}{16,5}$$

$$V_{TDC} = 17,951\ cm^3$$

Setelah mengetahui volume ruang bakar dengan menggunakan gasket dilanjutkan dengan menghitung besarnya volume gasket berdasarkan Tabel 3.2 dimana diameter gasket 7,8 cm dan ketebalannya 0,90 mm, sehingga:

$$V_{gasket} = \frac{\pi}{4} \times Bore^2 \times T_{gasket}$$

$$V_{gasket} = \frac{\pi}{4} \times (78\ mm)^2 \times 0,9\ mm$$

$$V_{gasket} = 4300,52\ mm^3 = 4,30052\ cm^3$$

Kemudian selisih dari V_{TDC} dengan V_{gasket} adalah volume ruang bakar mesin, maka diperoleh

$$V_{ruang\ bakar} = V_{TDC} - V_{gasket} \rightarrow 17,951\ cm^3 - 4,30052\ cm^3 = 13,654\ cm^3$$

Untuk memperoleh tebal gasket pada rasio kompresi 15.5 maka digunakan persamaan 2-1 kembali sebagai berikut.

$$15,5 = \frac{296,25 \text{ cm}^3}{\text{Volume TDC}} + 1$$

$$14,5 = \frac{296,25 \text{ cm}^3}{\text{Volume TDC}}$$

$$V_{\text{TDC } 15,5} = 20,43 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{gasket } 15,5} = V_{\text{TDC } 15,5} - V_{\text{ruang bakar}} \rightarrow 20,43 - 13,654 = 6,776 \text{ cm}^3$$

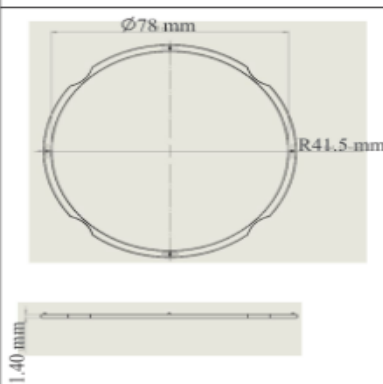
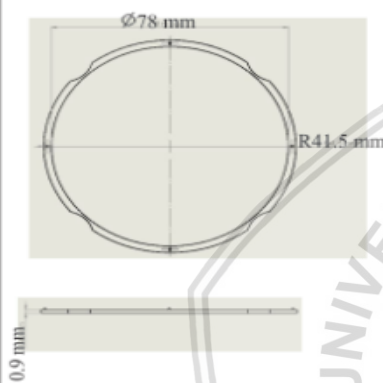
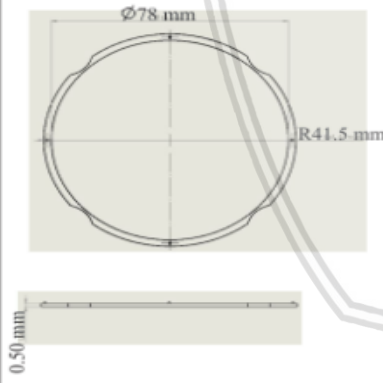
$$6,776 \text{ cm}^3 = \frac{\pi}{4} \times 7,8^2 \times T_{\text{gasket}}$$

$$T_{\text{gasket}} = \frac{6,776 \text{ cm}^3}{\frac{\pi}{4} \times (7,8 \text{ cm})^2}$$

$$T_{\text{gasket}} = 0,141877 \text{ cm} = 1,41 \text{ mm}$$

Sehingga untuk memperoleh tebal gasket dengan variasi kompresi lain dalam pengujian ini dapat mencontoh langkah perhitungan rasio kompresi 15.5.



| Dimensi | Volume Gasket | Rasio Kompresi |
|---|---------------|----------------|
|  | 6.7 ml | 15.5 |
|  | 4.3 ml | 17.5 |
|  | 2.4 ml | 19.5 |

Gambar 3.4 Bentuk dimensi gasket

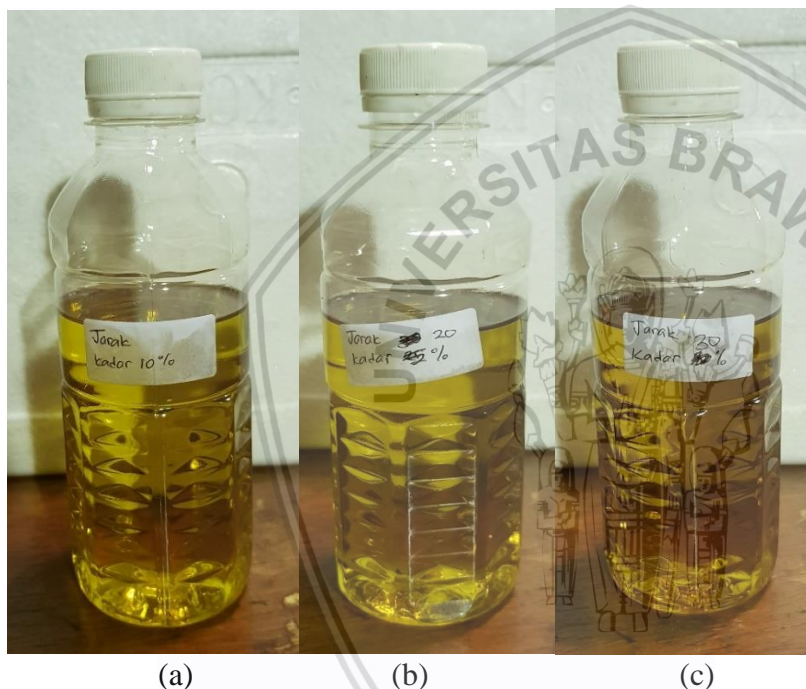
Tabel 3.3

Perbandingan Rasio Kompresi Terhadap Gasket

| Rasio Kompresi | Volume Gasket (ml) | Tebal Gasket (mm) |
|----------------|--------------------|-------------------|
| 19,5 | 2,4 | 0,5 |
| 17,5 (Standar) | 4,3 | 0,9 |
| 15,5 | 6,7 | 1,41 |

3.4.2 Pencampuran Bahan Bakar Biodiesel-Solar

Bahan bakar yang digunakan pada pengujian ini antara lain campuran bahan bakar solar dan biodiesel minyak jarak (*castor oil*). Cara mencampurkannya yaitu dengan menggunakan gelas ukur dan menghitung persentase kadar *castor oil* terhadap volume yang dikehendaki begitu pula dengan kadar solar. Setelah dihitung kadar *castor oil* dan solar kemudian dicampurkan ke dalam gelas ukur dan diaduk secara merata sehingga tidak terlihat adanya endapan. Kadar B10 menunjukkan campuran solar 90% dan 10% minyak jarak. Kadar B20 menunjukkan campuran solar 80% dan 20% minyak jarak. Kadar B30 menunjukkan campuran solar 70% dan 30% minyak jarak.



Gambar 3.5 Campuran biodiesel-solar (a) 10%, (b) 20% dan (c) 30% pada volume 200 ml
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

Sebelum penelitian, lakukan pengujian campuran biodiesel-solar yang telah dibuat sebelumnya dengan kadar masing-masing. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristiknya seperti nilai kalor bahan bakar, densitas, *flash point* dan viskositas.

Ketika mesin menyala dan beroperasi putarannya diatur sekitar 1800 rpm dahulu dan memanaskan mesin sampai temperatur sekitar 60°C hal ini dilakukan agar tiap pengambilan data diberi perlakuan yang sama.

3.5 Alat Pengukuran dan Bahan Yang Digunakan

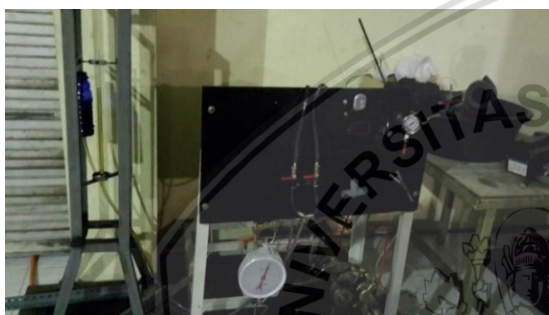
Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian kali ini adalah :

1. Unit *Engine Diesel Test Bench*



Gambar 3.6 Unit Engine YANMAR L70N
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

2. *Diesel Engine Test Bench*



Gambar 3.7 Diesel Engine Test Bench
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

3. *Tachometer*

Alat ini berfungsi untuk menghitung putaran pada poros mesin diesel (rpm).



Gambar 3.8 Tachometer
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

Tabel 3.4

Spesifikasi *Tachometer*

| | |
|-----------------------------|--|
| <i>Power Requirement</i> | DC 8-15V / AC 6-18V |
| <i>Measure range</i> | 3,8 ~ 9999 RPM |
| <i>Error Range</i> | 0.1 % (0,5-1,5 RPM) |
| <i>Clear Zero</i> | Automatic |
| <i>Clear zero time</i> | About 10s |
| <i>Refresh Frequency</i> | 0,2s (120-1200)RPM, 0,25 (2400-9999) RPM |
| <i>Response Frequency</i> | 100 Hz |
| <i>Tachometer size</i> | 78 x 42 x 13 mm |
| <i>Hall proximity model</i> | NJK - 5002C |
| <i>Detected objects</i> | Magnet |
| <i>Detection range</i> | 1 - 10 mm |
| <i>Sensor size</i> | 37 x 12 x 10 mm |

4. *Burret*

Digunakan untuk mengukur konsumsi bahan bakar dengan volume 25 ml.

Gambar 3.9 *Burret*

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

5. *Aerometer*

Untuk mengetahui massa jenis bahan bakar (kg/m^3)

Gambar 3.10 *Aerometer*

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

6. *Viscometer*

Digunakan untuk mengukur viskositas fluida (cSt)



Gambar 3.11 Viscometer

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

7. *Flash Point Tester*

Untuk mengetahui titik nyala api bahan bakar ($^{\circ}\text{C}$).



Gambar 3.12 Flash point tester

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

8. *Bomb Calorimeter*

Untuk mengetahui nilai kalor bahan bakar (kal/gr)

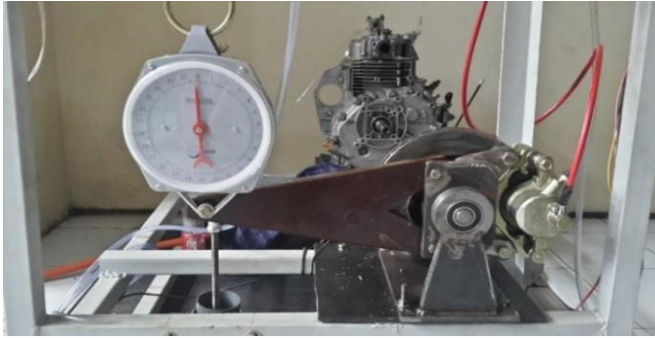


Gambar 3.13 Bomb Calorimeter

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

9. *Dynamometer*

Digunakan untuk mengetahui torsi pada poros (kgf).



Gambar 3.14 Dynamometer

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

10. *Stopwatch*

Untuk mengetahui waktu banyaknya konsumsi bahan bakar (s).



Gambar 3.15 Stopwatch

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

11. *Thermogun*

Untuk mengukur temperature pada mesin diesel ($^{\circ}\text{C}$).



Gambar 3.16 Thermogun

Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

Tabel 3.5
Spesifikasi *Thermo Gun*

| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| <i>Merk</i> | Krisbow |
| <i>Tipe</i> | - |
| <i>Temperature Range</i> | - 32 to 375 °C (-25,6 to 707 °F) |
| <i>Repeatability</i> | 1% of reading or 1±°C |
| <i>Weight/dimensions</i> | 145 g/152*130*38 mm |
| <i>Power</i> | 9 V Alkaline |

12. Minyak Solar

Sebagai bahan bakar utama mesin diesel



Gambar 3.17 Minyak Solar
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

13. Biodiesel

Sebagai bahan bakar alternative selain solar. Biodiesel yang digunakan adalah minyak jarak dari tumbuhan jarak kepyar atau *castor oil* (*Ricinus communis L.*).



Gambar 3.18 Biodiesel *Castor Oil*
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

3.6 Prosedur Pengambilan Data

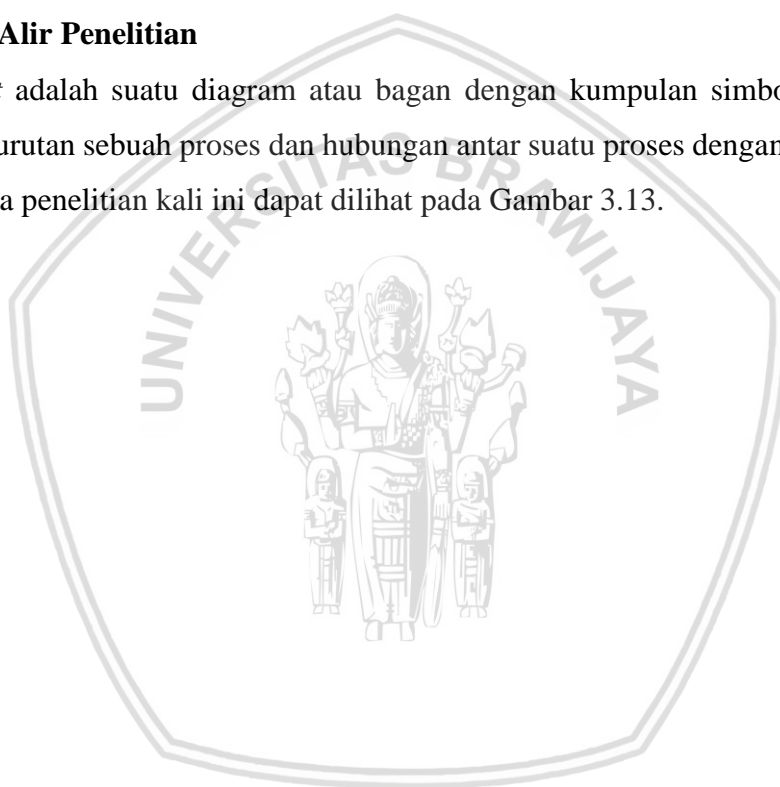
Sebelum pengambilan data dilakukan adapun langkah–langkah persiapan yang dilakukan sebagai berikut.

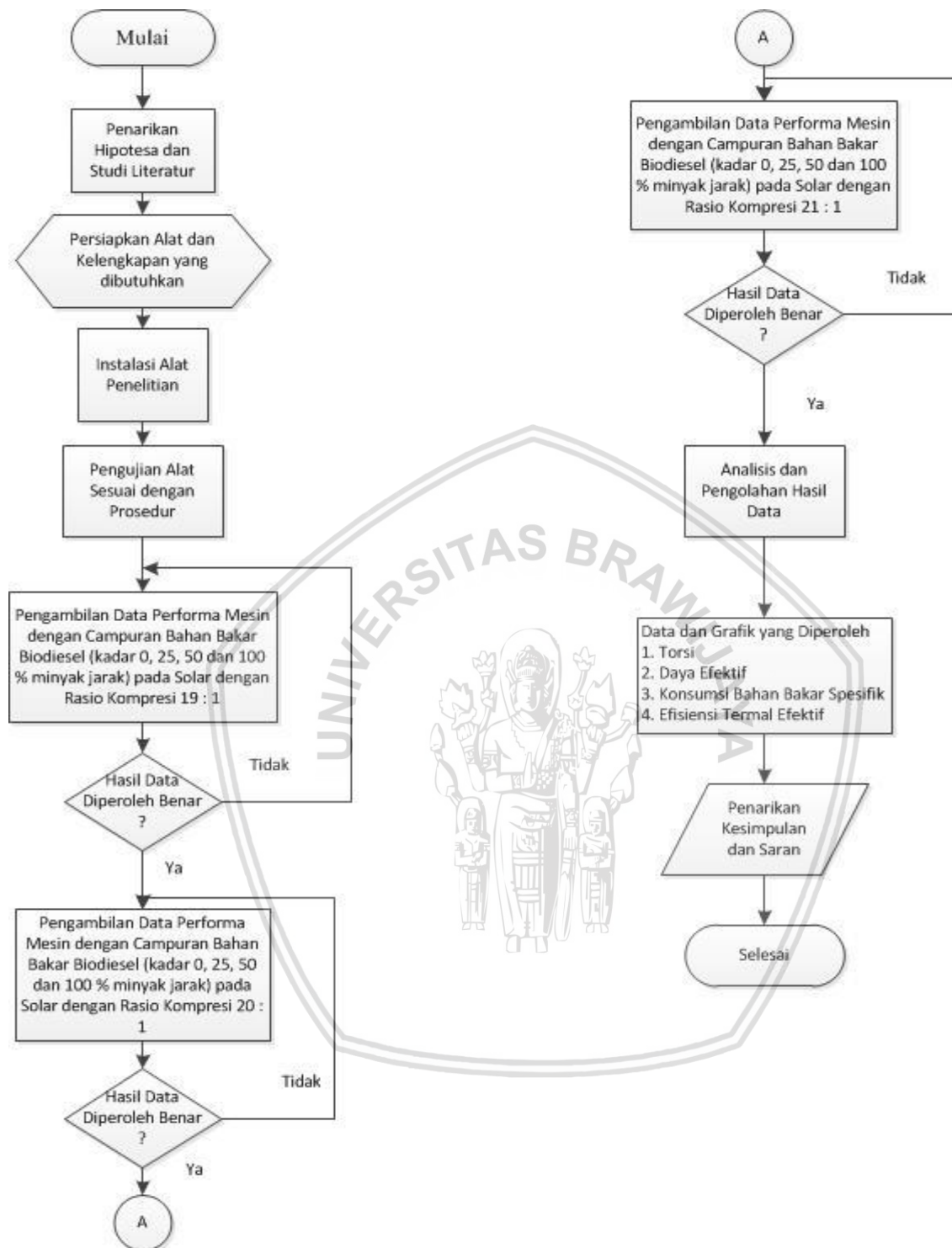
1. Persiapkan alat dan bahan serta perlengkapan yang dibutuhkan
2. Memastikan seluruh komponen mesin telah terpasang dengan baik
3. Mengatur rasio kompresi sesuai dengan variasi yang diinginkan
4. Pastikan katup atau keran tertutup pada tangki dan tabung gelas ukur
5. Memasukkan bahan bakar dengan kadar yang telah ditentukan ke dalam tangki dan tabung gelas ukur
6. Lepaskan saluran bahan bakar yang menuju pompa bahan bakar, lalu katup atau keran bahan bakar dari tangki dibuka secara perlahan sampai pompa terisi dengan bahan bakar. Bila sudah terisi pasang kembali saluran bahan bakar dengan pompa
7. Memastikan keran atau katup bahan bakar dari tangki sudah terbuka dan keran bahan bakar dari tabung gelas ukur dalam keadaan tertutup
8. Pastikan kunci kontak dalam posisi *on*
9. Sebelum menyalakan mesin, tarik tuas *decompressed* diikuti dengan menekan tombol *starter* $\pm 1,5$ detik, lalu lepas tuas *decompressed* dan tombol *starter* secara bersamaan (langkah ini diulang hingga mesin menyala)
10. Setelah mesin menyala, dibiarkan selama beberapa saat sambil diukur dengan *thermogun* sampai temperaturnya $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$
11. Atur beban pengereman sebesar $1,00 \text{ kg/cm}^2$
12. Atur putaran mesin pada rpm yang ditentukan yaitu 1800 – 3000 rpm
13. Mengukur banyaknya debit bahan bakar dan beban pengereman pada putaran 1800, 2100, 2400, 2700 dan 3000 rpm
14. Lakukan pengambilan data sebanyak 3 kali seperti pada langkah 13 tiap putaran poros mesin tiap satu variasi bahan bakar
15. Setelah selesai ambil data, matikan mesin dengan cara melepas beban pengereman terlebih dulu lalu tarik tuas dekompresi dan tutup secara penuh *throttle* dan pastikan kunci kontak dalam posisi *off*
16. Setelah mesin berhenti selanjutnya kuras bahan bakar dengan cara melepas saluran bahan bakar yang terhubung dengan pompa bahan bakar
17. Ganti bahan bakar yang telah ditentukan variasi bahan bakar lainnya dan ulangi langkah 4-16

18. Setelah mendapat data dari variasi bahan bakar dengan rasio kompresi sama maka langkah selanjutnya mengubah rasio kompresi yang ditentukan sebelumnya dan ulangi langkah 1-16
19. Apabila telah selesai mengambil data biarkan mesin menyala beberapa saat, lalu dimatikan
20. Kembalikan alat dan kelengkapan pada tempatnya dan pastikan kelistrikan mesin sudah mati

3.7 Diagram Alir Penelitian

Flowchart adalah suatu diagram atau bagan dengan kumpulan simbol tertentu yang menunjukkan urutan sebuah proses dan hubungan antar suatu proses dengan proses lainnya. *Flowchart* pada penelitian kali ini dapat dilihat pada Gambar 3.13.





Gambar 3.19 Flowchart penelitian
Sumber: Dokumentasi pribadi (2018)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Sebelum pengujian dimulai, diambil sampel data bahan bakar campuran tiap variasi terlebih dahulu. Variasi bahan bakar campuran biodiesel *castor oil* dan solar yang digunakan adalah B0 (solar murni), B10, B20 dan B30. Dimana proses pencampuran bahan bakar dilakukan dengan persentase volume seperti pada Tabel 4.1. Sesudah mengambil sampel data tiap variasi, pengambilan data dilakukan dengan mengubah rasio kompresi mesin kemudian mengganti bahan bakar. Cara pengambilan data dilakukan dengan mengoperasikan motor pada putaran 1600 – 2400 rpm dengan interval putaran 200 rpm. Data hasil pengujian yang diperoleh dari *diesel engine test bench* adalah sebagai berikut :

Tekanan pembebanan : 1.00 kg/cm²

Temperatur mesin : 75±5°C

Waktu debit bahan bakar : 10 s

Tabel 4.1
Persentase Volume *Castor Oil* Campuran Bahan Bakar

| Bahan Bakar | Persentase Volume (%) | |
|-------------|-----------------------|-----------|
| | Solar | Biodiesel |
| B 0 | 100 | 0 |
| B 10 | 90 | 10 |
| B 20 | 80 | 20 |
| B 30 | 70 | 30 |

Tabel 4.2
Data Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Bakar

| Jenis Bahan Bakar | Solar | B10 | B20 | B30 | B100 |
|--------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|---------|
| Massa Jenis (gr/ml) | 0.848 | 0.835 | 0.843 | 0.852 | 0.965 |
| <i>Lower Heating Value</i> (kcal/kg) | 10742.676 | 10400.96 | 10306.27 | 10258.03 | 9364.32 |
| Viskositas (Cst) @25°C | 4.5 | 4.79 | 6.09 | 7.4 | 25.39 |
| <i>Flashpoint</i> (°C) | 60 | 65.8 | 65.8 | 79 | 138 |

Pengujian karakteristik solar murni dan campuran biodiesel *castor oil* (B10, B20 dan B30) dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya seperti densitas, nilai kalor, viskositas dan *flashpoint* yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Diantara sifat-sifat bahan bakar diesel yang paling penting terkait sifat pembakaran adalah kualitas penyalan, viskositas dan *flashpoint* (Hardjono, 2010). Dari Tabel 4.2 dapat diperoleh bahwa nilai kalor bahan bakar campuran solar dengan biodiesel dari *castor oil* mengalami penurunan. Perbedaan ini disebabkan panjang dan kompleksnya rantai karbon pembentuk senyawa nabati dan tingkat kejenuhan asam lemak dalam bahan baku biodiesel (Mohamad Tajul, 2016).

Hasil pengujian data yang diperoleh seperti pada Tabel 2 sampai 4 pada Lampiran 1 adalah gaya pembebanan dan konsumsi bahan bakar gaya pembebanan yang didapatkan dengan cara membaca skala pada neraca pegas dynamometer yang disambungkan ke poros dengan beban pengereman sebesar $1,00 \text{ kg/cm}^2$ yang dilakukan dengan putaran dari 1600 sampai 2400 rpm dimana intervalnya 200 rpm untuk setiap variasi pengujian dan konsumsi bahan bakar didapatkan dengan cara menghitung laju bahan bakar pada *burret* selama 10 detik.

4.1.2 Pengolahan Data

Dari Tabel 2 sampai 4 pada Lampiran 1 diperoleh hasil dari pengujian dari *diesel engine test bench*. Langkah selanjutnya yaitu pengolahan data. Dari data tersebut dapat diperoleh antara lain torsi, daya efektif, *specific fuel consumption effective* dan efisiensi *thermal* efektif. Sebagai contoh perhitungan, data diambil dari pengujian dengan bahan bakar B0 dan variasi rasio kompresi 17.5 pada putaran 2000 rpm adalah sebagai berikut :

Lower heating value solar : 10742.676 kcal/kg

Massa jenis : 0.815 g/ml

Viskositas @25°C : 4.5 cSt

Panjang lengan dynamometer : 0.315 m

Flashpoint : 60°C

Waktu debit bahan bakar : 10 s

- Torsi pada *crankshaft* (T)

$$T = 1,000 \text{ kgf} \times 0.315 \text{ m}$$

$$= 0,315 \text{ kgf.m}$$

- Daya efektif (Ne)

$$Ne = \frac{0.315 \text{ kgf.m} \times 2000 \text{ rpm}}{716.2}$$

$$Ne = 0,87964 \text{ PS}$$

- *Fuel Consumption (FC)*

$$FC = \frac{0.9 \text{ ml}}{10 \text{ s}} \times 0.815 \text{ g/ml} \times \frac{3600}{1000}$$

$$FC = 0.26406 \text{ kg/jam}$$

- *Specific Fuel Consumption Effective (SFCe)*

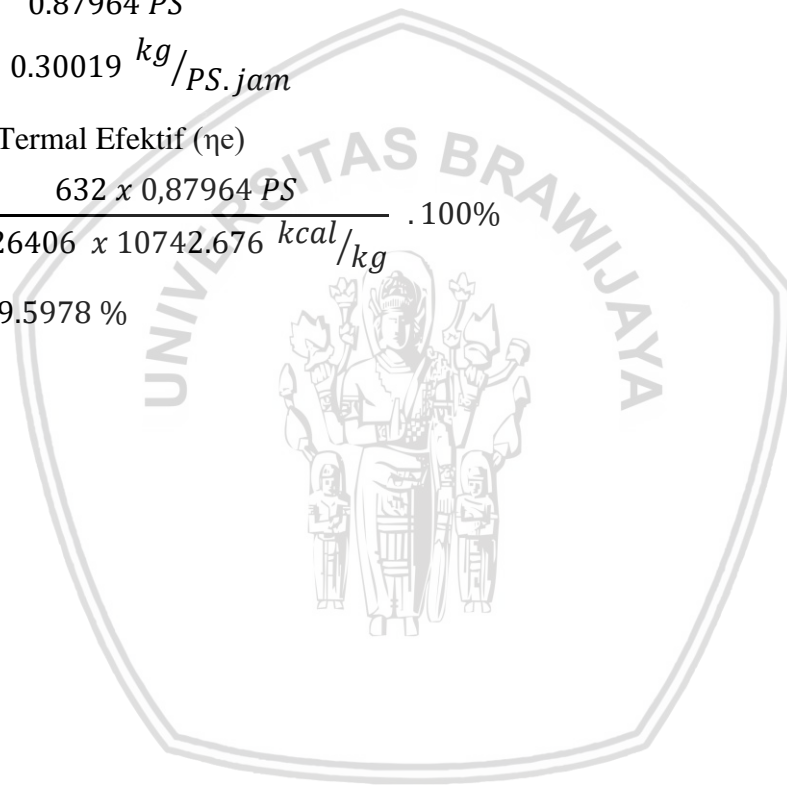
$$SFCe = \frac{0.2646 \text{ kg/jam}}{0.87964 \text{ PS}}$$

$$SFCe = 0.30019 \text{ kg/PS.jam}$$

- *Efisiensi Termal Efektif (η_e)*

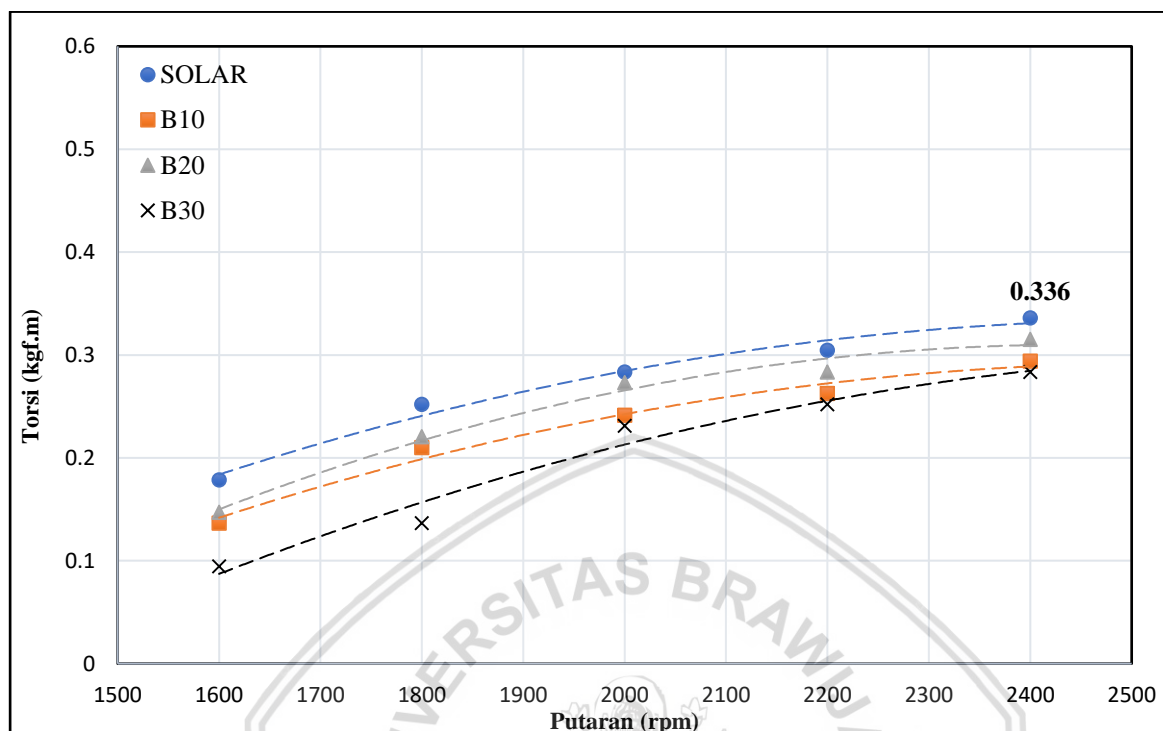
$$\eta_e = \frac{632 \times 0.87964 \text{ PS}}{0.26406 \times 10742.676 \text{ kcal/kg}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{te} = 19.5978 \%$$

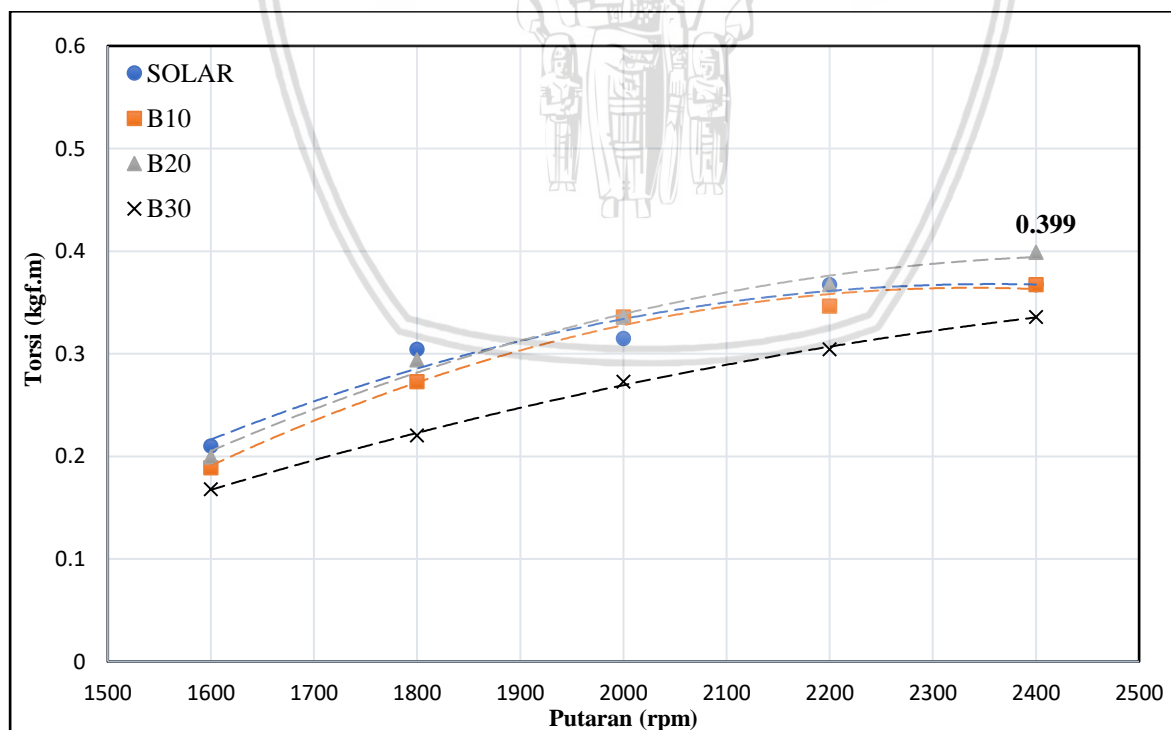


4.2 Pembahasan Grafik

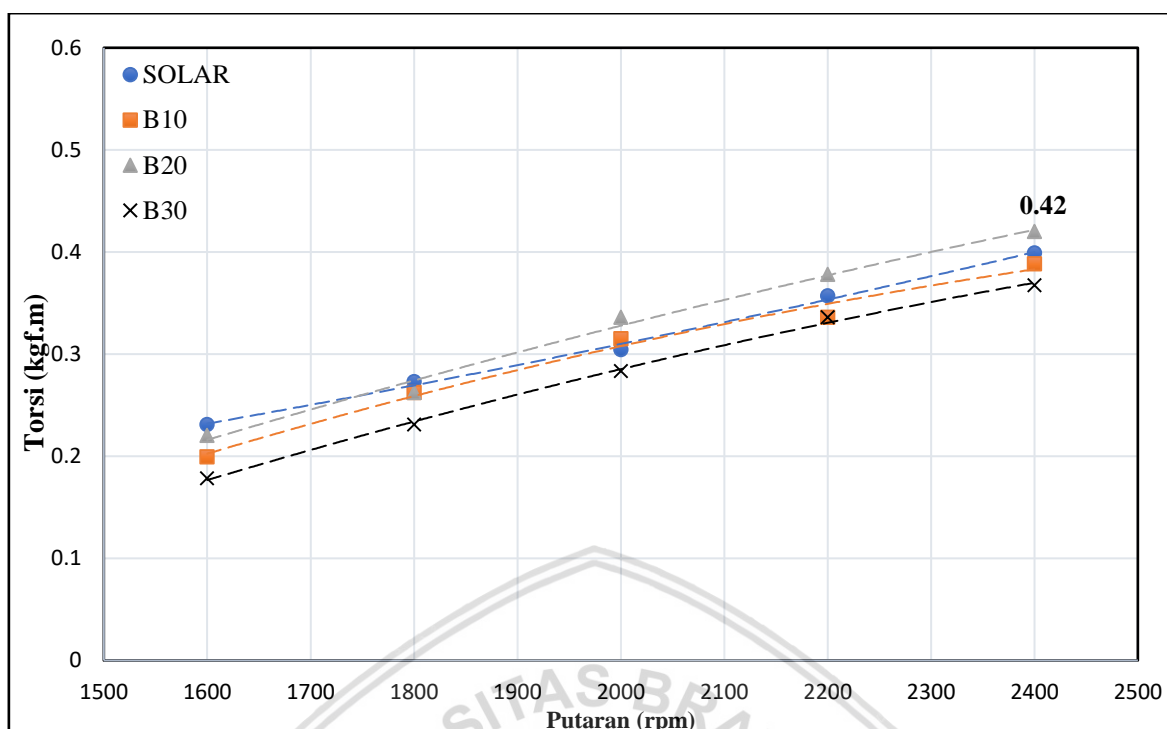
4.2.1 Hubungan Putaran Terhadap Torsi



Gambar 4.1 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5



Gambar 4.2 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5



Gambar 4.3 Grafik hubungan putaran terhadap torsi dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5

Gambar grafik 4.1 sampai dengan 4.3 menunjukkan hubungan antara torsi terhadap putaran mesin dari *diesel engine test bench*. Torsi bisa diperoleh dari perkalian antara beban pengereman pada poros yang terbaca di neraca pegas dengan panjang lengan *dynamometer*. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa meningkatnya putaran maka akan semakin meningkat pula torsi yang dihasilkan. Saat putaran poros semakin meningkat jumlah campuran bahan bakar dan udara yang masuk ke silinder semakin banyak, sehingga tekanan dan energi panas hasil dari pembakaran akan semakin meningkat sehingga torsi yang dihasilkan juga meningkat (Andi Widiyanto, 2014).

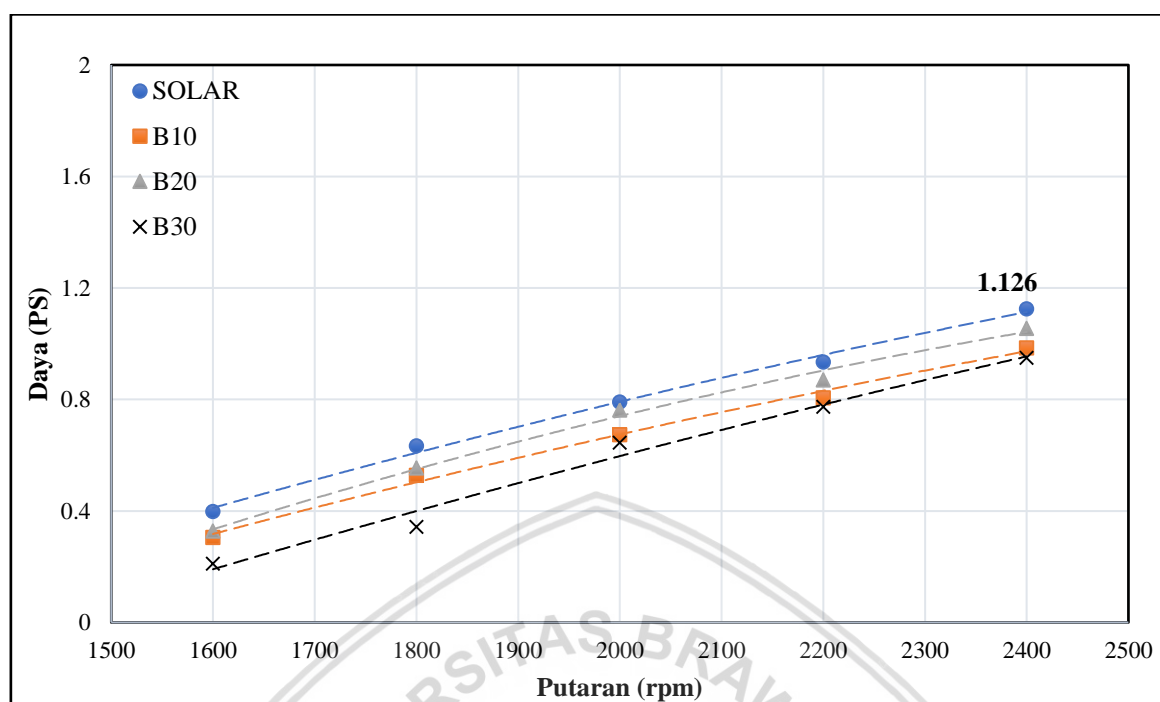
Dari ketiga grafik diatas, dengan bertambahnya kadar biodiesel pada bahan bakar pada rasio kompresi yang tetap akan menurunkan nilai torsi. Hal ini disebabkan karena karakteristik biodiesel yang terdapat pada Tabel 4.2 dimana semakin meningkatnya kadar biodiesel maka bahan bakar campuran tersebut memiliki nilai kalor (*lower heating value*) yang lebih rendah dibandingkan solar murni (Adly Havendri, 2008). Akan tetapi seiring dengan meningkatnya rasio kompresi akan memperbaiki karakteristik pembakaran dan penambahan biodiesel pada kadar tertentu, sehingga torsi yang dihasilkan cenderung semakin meningkat (Sivaganesan *et al*, 2017). Hal ini disebabkan karena biodiesel memiliki angka setana dan *flashpoint* yang lebih tinggi meskipun nilai LHV bahan bakar yang lebih rendah dibanding solar murni (Mohamad Tajul, 2016). Angka setana yang semakin tinggi menunjukkan kualitas pembakaran yang lebih bagus seperti *ignition delay* yang semakin

pendek, kecepatan rambat bahan bakar yang lebih cepat dan pembakarannya lebih sempurna. Sebaliknya angka setana yang rendah akan menyebabkan *starting* yang lebih sulit, *ignition delay* semakin panjang, menghasilkan getaran yang lebih tinggi dan pembakaran yang kurang sempurna (Jaichandar, 2016).

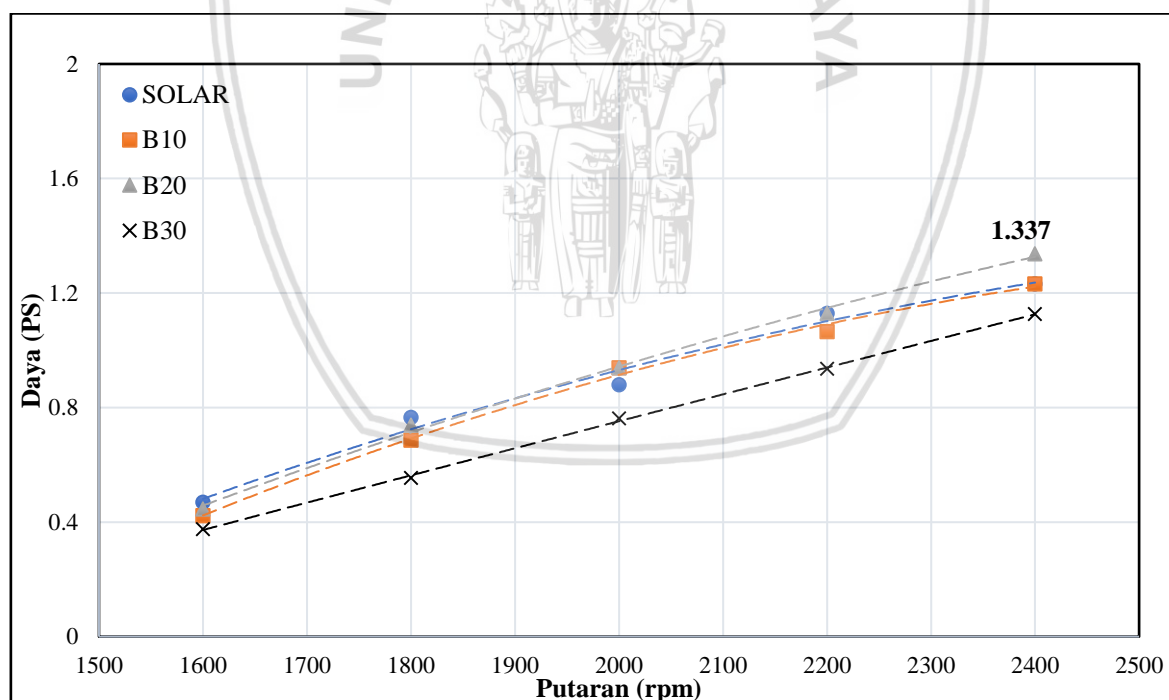
Semakin meningkatnya rasio kompresi, *ignition delay* akan berlangsung semakin singkat karena rasio kompresi yang semakin tinggi akan menaikkan tekanan dan temperatur ruang bakar. Meningkatnya rasio kompresi, temperatur udara dalam silinder akan meningkat dan proses pembakaran terjadi lebih awal sehingga mengurangi waktu *ignition delay* (Hariram, 2015). Penambahan biodiesel bisa membantu proses terbakarnya solar supaya lebih sempurna sehingga tekanan dalam ruang bakar dan torsi yang dihasilkan semakin besar (Singh *et al.*, 2016). Namun penambahan kadar biodiesel yang berlebihan bisa menyebabkan bahan bakar tidak sepenuhnya terbakar sempurna sehingga energi panas yang dihasilkan semakin menurun yang akan mempengaruhi turunnya nilai torsi (Andi Widiyanto, 2014). Sehingga dengan bertambahnya kadar biodiesel pada bahan bakar campuran harus diiringi dengan rasio kompresi yang semakin tinggi untuk memperbaiki karakteristik biodiesel yang mana nilai kalornya lebih rendah daripada solar.

Dari ketiga grafik tersebut torsi paling besar diperoleh pada bahan bakar campuran B20 dengan rasio kompresi 19,5 sebesar 0,42 kgf.m karena biodiesel *castor oil* memiliki angka setana yang tinggi sehingga pembakarannya bisa lebih sempurna dan pada biodiesel memiliki kandungan oksigen lebih dibandingkan pada solar yang mana oksigen tersebut dapat membantu proses pembakaran bisa lebih sempurna. Sementara itu untuk rasio kompresi 17,5 torsi paling besar diperoleh dengan bahan bakar B20 yaitu 0,399 kgf.m. Sedangkan pada rasio kompresi 15,5 solar murni menghasilkan torsi paling besar yaitu sebesar 0,336 kgf.m. Dari grafik tersebut dapat dibuktikan bahwa meningkatnya kadar biodiesel diiringi dengan meningkatnya rasio kompresi dapat meningkatkan torsi yang dihasilkan dimana kadar B20 merupakan kadar yang paling bagus pada rasio kompresi yang tinggi.

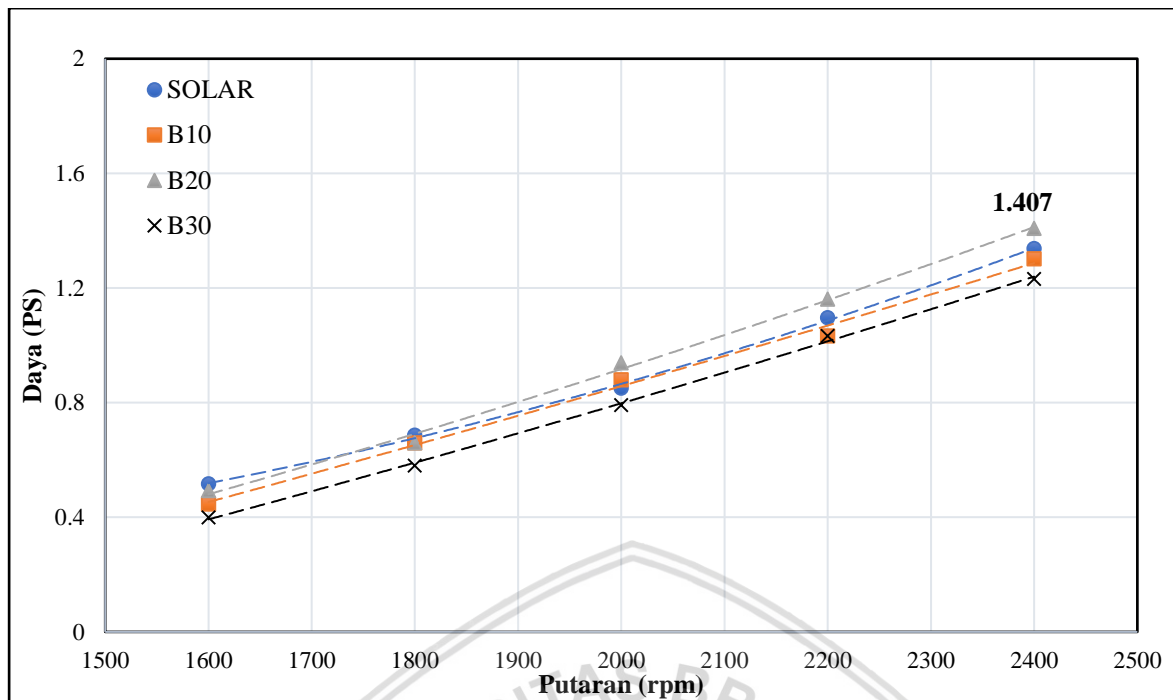
4.2.2 Hubungan Putaran Terhadap Daya Efektif



Gambar 4.4 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5



Gambar 4.5 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5



Gambar 4.6 Grafik hubungan putaran terhadap daya efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19,5

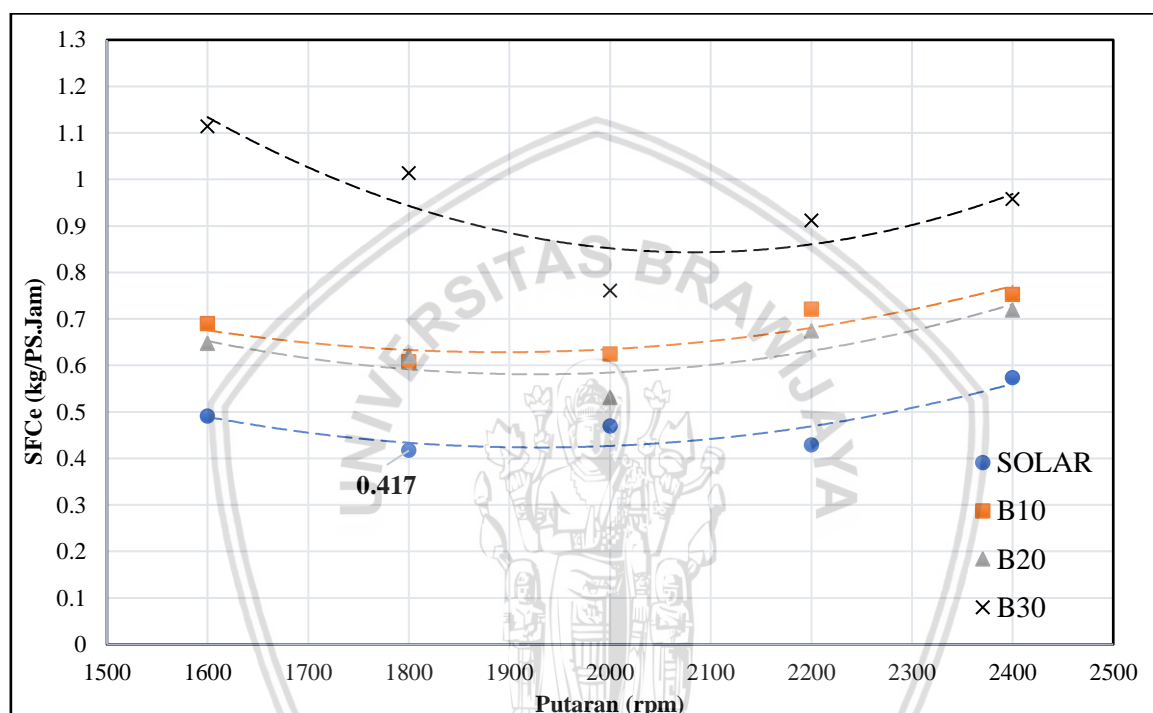
Gambar 4.4 sampai 4.6 diatas merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara daya efektif dengan putaran mesin yang mana grafik diatas memiliki kecenderungan yang sama seperti hubungan grafik torsi dengan putaran. Dimana semakin besar putaran poros, daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Hal ini disebabkan nilai dari daya efektif yang diperoleh dari hubungan torsi dan putaran yang berbanding lurus (Suhartanta & Zainal Arifin, 2008).

Meningkatnya kadar biodiesel pada bahan bakar dengan rasio kompresi yang tetap akan menyebabkan menurunnya daya efektif karena rendahnya nilai kalor biodiesel dibanding solar sehingga kemampuannya menghasilkan daya lebih rendah (Prastantyo, 2012) namun dengan meningkatnya rasio kompresi maka daya efektif yang dihasilkan juga akan semakin meningkat seperti pada hubungan torsi dengan putaran dimana semakin besar nilai torsi dan putaran maka daya yang dihasilkan juga makin meningkat. Selain itu peningkatan daya efektif juga disebabkan karena tingginya angka setana biodiesel dan keunggulan biodiesel dalam komposisi kimianya, karena dalam biodiesel terdapat atom-atom oksigen, hal ini yang tidak terdapat pada solar murni (Adly Havendri, 2008).

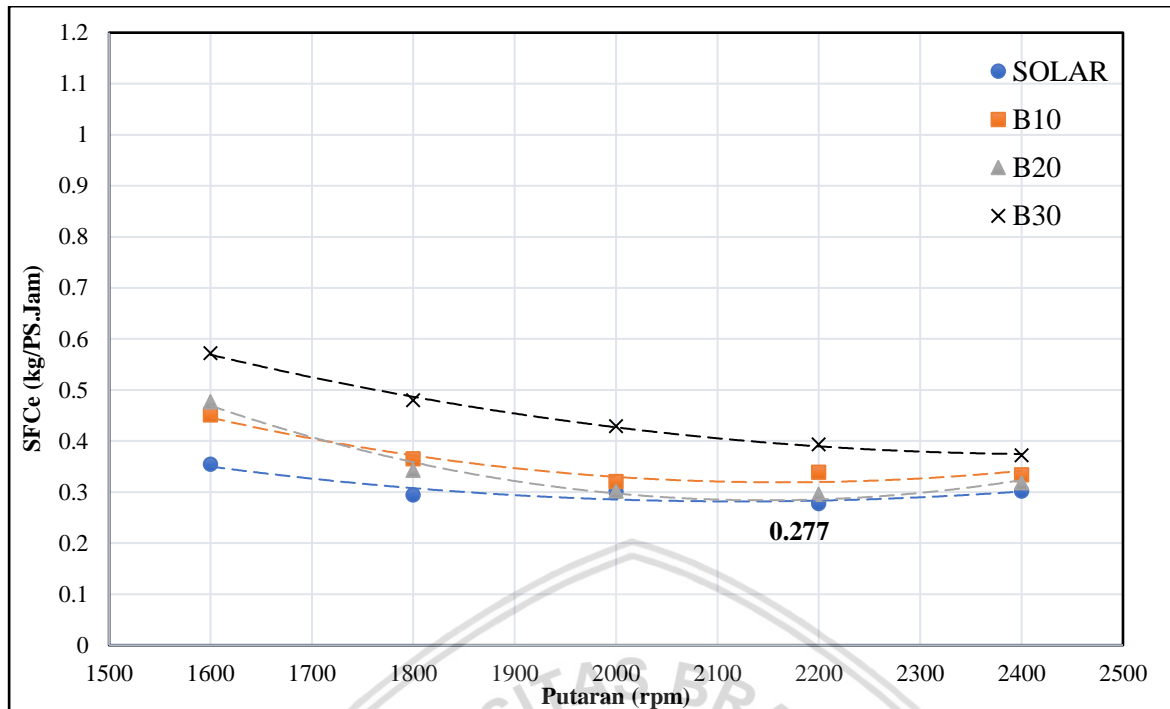
Nilai daya terbesar didapat saat penggunaan rasio kompresi 19,5 dengan bahan bakar B20, sebesar 1,407 PS pada putaran 2400 RPM. Kemudian pada rasio kompresi 17,5 nilai daya terbesar didapatkan pada bahan bakar B20 sebesar 1,337 PS pada putaran 2400 RPM

sementara pada rasio kompresi 15,5 diperoleh daya tertinggi pada putaran 2400 RPM sebesar 1,126 PS dengan bahan bakar solar murni. Sehingga dari grafik tersebut bahwa biodiesel bisa meningkatkan daya efektif yang dihasilkan seiring dengan meningkatnya rasio kompresi dimana kadar terbaik adalah pada B20 hal ini dikarenakan rendahnya nilai kalor yang terkandung pada biodiesel bisa dibantu oleh pembakaran biodiesel yang lebih sempurna karena didalam kandungannya terdapat oksigen (Sahirman, 2009).

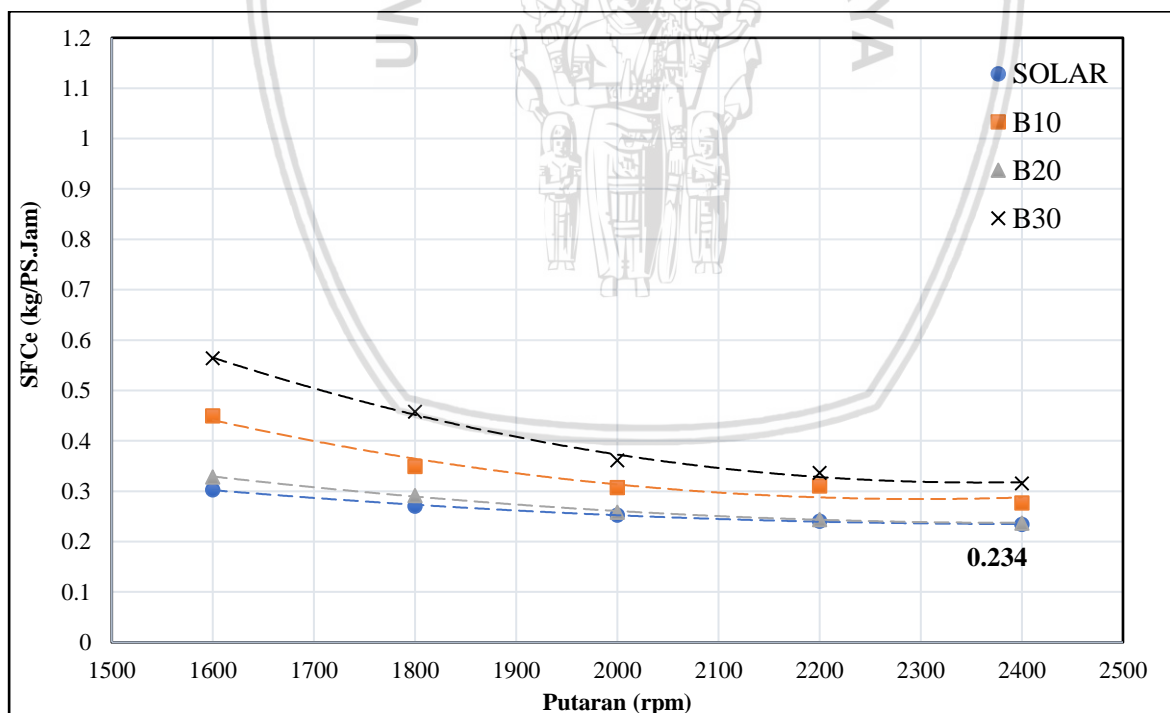
4.2.3 Hubungan Putaran Terhadap *Specific Fuel Consumption Effective*



Gambar 4.7 Grafik hubungan putaran terhadap *specific fuel consumption effective* dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5.



Gambar 4.8 Grafik hubungan putaran terhadap *specific fuel consumption effective* dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5



Gambar 4.9 Grafik hubungan putaran terhadap *specific fuel consumption effective* dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5

Gambar 4.7 sampai dengan 4.9 merupakan grafik yang menjelaskan hubungan antara putaran dengan *specific fuel consumption effective* (SFCe). SFCe sendiri merupakan suatu ukuran banyaknya bahan bakar yang digunakan suatu mesin untuk menghasilkan daya

efektif pada rentang waktu tertentu dimana semakin kecil nilai SFCE maka semakin ekonomis. SFCE ini dapat dipakai sebagai indikator efisiensi kendaraan (Suhartanta & Zainal Arifin, 2008). Dari grafik tersebut memiliki kecenderungan menurun sampai titik tertentu kemudian naik. Hubungan SFCE berbanding terbalik dengan daya efektif dimana semakin besar daya yang dihasilkan maka nilai SFCE semakin kecil.

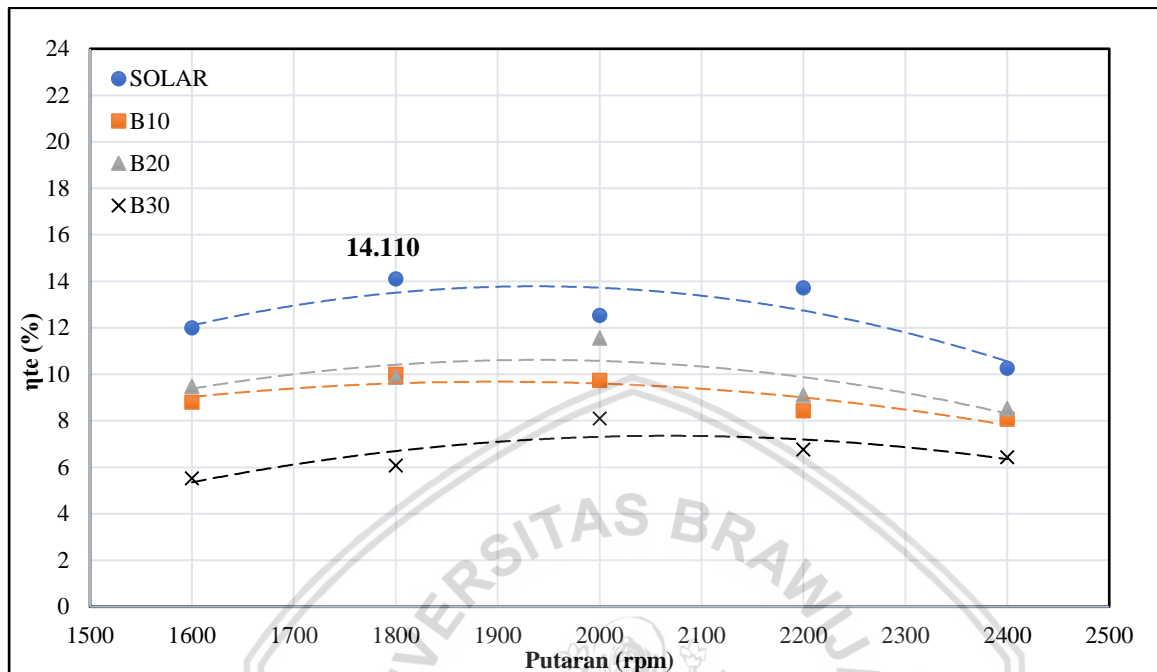
Pada putaran awal nilai SFCE cukup tinggi kemudian SFCE semakin turun seiring dengan meningkatnya putaran sampai pada titik tertentu kemudian naik kembali. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi putaran maka daya efektif juga akan semakin membesar sehingga nilai SFCE turun, tetapi pada putaran yang terlalu tinggi nilai SFCE akan meningkat karena terdapat kerugian mekanis (Okta Yama, 2017). Naiknya SFCE pada putaran tinggi juga bisa disebabkan karena proses pembakaran yang terjadi pada putaran tinggi sangat cepat sehingga campuran udara bahan bakar tidak bisa terbakar secara sempurna (Isalmi Aziz, 2010). Pada putaran tinggi proses pembakaran terjadi sangat cepat sehingga campuran udara dengan bahan bakar tidak bisa terbakar dengan sempurna karena campuran yang baru masuk terlalu cepat menggantikan campuran lama yang belum seluruhnya terbakar. Sehingga kebutuhan bahan bakar pada putaran tinggi semakin meningkat (Kusuma, 2003). Dikarenakan densitas campuran biodiesel lebih besar dibandingkan solar maka massa bahan bakar biodiesel lebih besar daripada solar pada volume yang sama. Karena massa campuran bahan bakar lebih banyak yang mengalir masuk ke ruang silinder maka konsumsi bahan bakar yang terjadi juga semakin besar (Mariyamah, 2017).

Berdasarkan grafik diatas nilai SFCE paling rendah diperoleh pada rasio kompresi 19,5 dengan bahan bakar solar yaitu sebesar 0,234 kg/PS.Jam pada putaran 2400. Kemudian pada rasio kompresi 17,5 diperoleh hasil paling baik saat putaran 2200 RPM dengan bahan bakar solar murni sebesar 0,277 kg/PS.Jam. Sedangkan pada rasio kompresi 15,5 diperoleh hasil terbaik pada putaran 1800 RPM yaitu sebesar 0,417 kg/PS.Jam dengan bahan bakar solar murni.

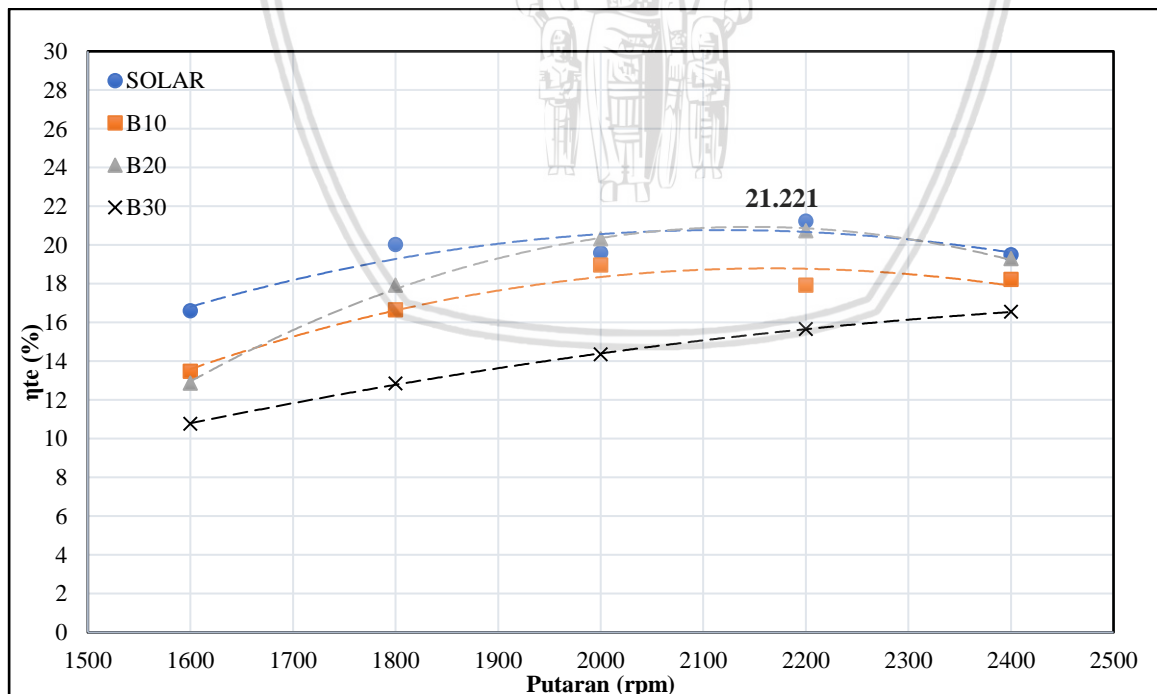
Dari grafik tersebut bisa diperoleh bahwa meningkatnya rasio kompresi akan memberikan nilai SFCE yang semakin bagus. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya rasio kompresi akan berdampak kepada peningkatan temperatur pada silinder sehingga bahan bakar bisa terbakar secara cepat. Namun secara keseluruhan penambahan biodiesel pada solar menyebabkan nilai SFCE semakin meningkat, hal ini dikarenakan nilai kalor biodiesel lebih rendah dibanding solar sehingga konsumsi bahan bakarnya semakin besar (Ramesh *et al*, 2008). Seperti pada penggunaan bahan bakar B30 dimana memiliki nilai

SFCe tertinggi karena nilai kalor yang dihasilkan rendah dan daya yang efektif yang dihasilkan juga kecil.

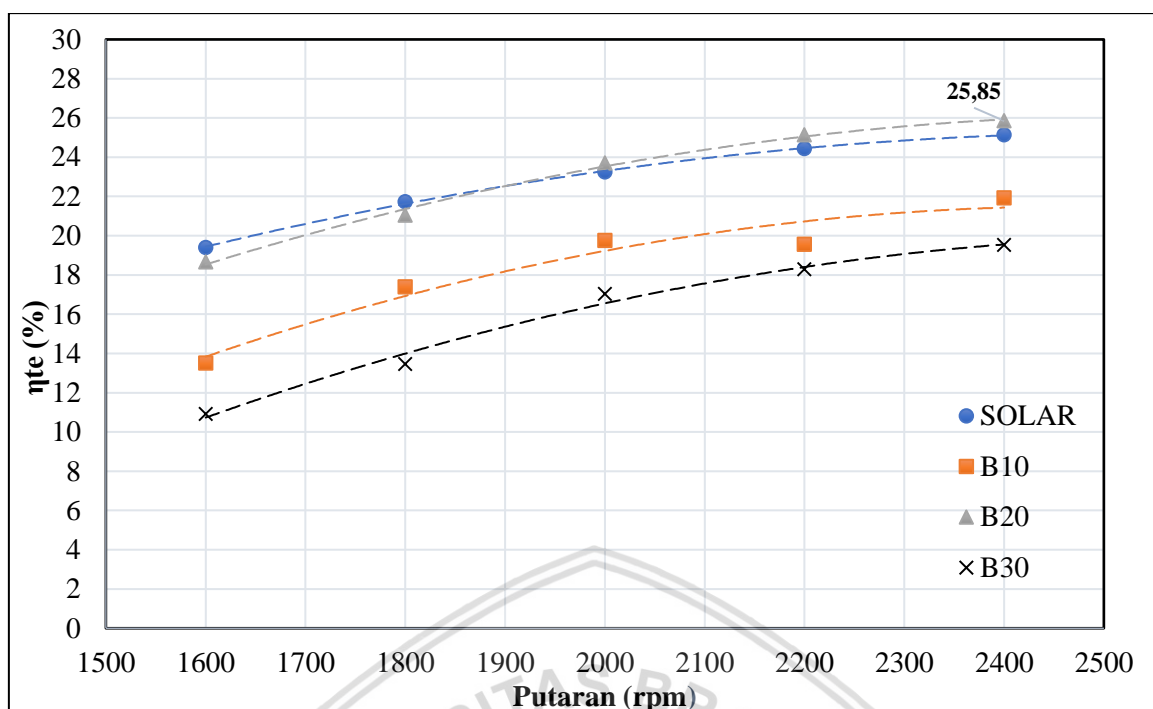
4.2.4 Hubungan Putaran Terhadap Efisiensi Termal Efektif



Gambar 4.10 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 15.5



Gambar 4.11 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 17.5



Gambar 4.12 Grafik hubungan putaran terhadap efisiensi termal efektif dengan variasi bahan bakar campuran pada rasio kompresi 19.5

Gambar 4.10 sampai dengan 4.12 diatas menunjukkan grafik hubungan antara putaran dengan efisiensi termal efektif dimana kecenderungan grafiknya semain meningkatnya putaran maka efisiensi makin meningkat sampai titik tertentu kemudian turun. Nilai dari efisiensi termal efektif sendiri dipengaruhi oleh daya efektif dan konsumsi bahan bakar yang mana nilai efisiensi berbanding lurus dengan daya efektif dan berbanding terbalik dengan konsumsi bahan bakarnya.

Dari ketiga grafik tersebut pada bahan bakar biodiesel memiliki efisiensi termal efektif yang paling tinggi saat penggunaan bahan bakar B20 dengan meningkatnya rasio kompresi mesin dan penambahan kadar biodiesel yang tepat bisa meningkatkan efisiensi termal efektif dikarenakan karakteristik biodiesel dimana membutuhkan temperatur yang cukup tinggi untuk bisa terbakar sempurna (Sivaganesan *et al*, 2017). Hasil terbaik pada rasio kompresi 19,5 dengan bahan bakar campuran B20 pada putaran 2400 RPM yaitu sebesar 25,853 %. Selanjutnya pada rasio kompresi 17.5 dengan bahan bakar solar murni nilai efisiensi tertinggi diperoleh sebesar 21,221 % pada putaran 2200 RPM. Kemudian pada rasio kompresi 15,5 bahan bakar solar murni memiliki efisiensi tertinggi pada putaran 1800 RPM yaitu sebesar 14,11 %.

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa meningkatnya rasio kompresi bisa meningkatkan daya efektif mesin yang menyebabkan efisiensi termal efektif semakin meningkat. Saat rasio kompresi meningkat, tekanan dan temperatur ruang silinder meningkat

juga sehingga menyebabkan proses pembakaran berlangsung cepat sehingga tekanan hasil pembakaran turut meningkat akan tetapi dengan penambahan kadar biodiesel yang berlebihan bisa menyebabkan efisiensi termal mengalami penurunan (Pramanik, 2003). Hal ini dikarenakan semakin banyak kadar biodiesel maka nilai LHV juga semakin turun dan viskositas yang semakin tinggi menyebabkan pembakaran yang kurang sempurna (Jaichandar, 2016).

4.3 Penggunaan Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Alternatif

Penggunaan biodiesel sebagai alternatif bahan bakar pengganti solar memiliki keuntungan seperti bahan baku yang mudah didapatkan dibudidayakan, menghasilkan torsi dan daya yang lebih besar, menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah dan mampu meningkatkan unjuk kerja mesin diesel (Mohamad Tajul, 2016). Dari beberapa penelitian sebelumnya banyak yang menemukan bahwa *castor oil* dari tanaman jarak kepyar bisa memenuhi standar sebagai bahan bakar alternatif. Biodiesel yang terbuat dari minyak biji jarak ternyata memiliki spesifikasi yang memenuhi standar sebagai bahan bakar mesin diesel sebagai pengganti solar (Setyadi, 2003). Dimana kadar biodiesel 20% merupakan kadar terbaik untuk mesin diesel (Murugesan, 2009). Adapun pemakaian bahan bakar alternatif lain pengganti solar yaitu pemakaian metanol. Metanol bisa digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin diesel dengan pertimbangan bahwa metanol dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil juga terbukti bisa menurunkan emisi (Syaiful, 2013).

Metanol memiliki viskositas yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar solar sehingga mudah untuk diinjeksi, diatomisasi dan dicampur dengan udara (Sayin, 2010). Bahan bakar metanol dapat digunakan secara murni maupun dicampur dengan bahan bakar lain namun karakteristik metanol yang menjadi permasalahan pada mesin diesel adalah rendahnya angka setana, tingginya panas laten dan panjangnya *ignition delay* yang disebabkan kedua faktor tersebut (Agarwal, 2007). Bahan bakar alkohol memiliki angka setana yang rendah, sehingga karakteristik pembakarannya sangat buruk. Oleh sebab itu penggunaan campuran alkohol sebagai bahan bakar justru menghasilkan efisiensi termal yang lebih rendah dibandingkan dengan solar (Zhu, 2010).

Sehingga penggunaan biodiesel dibanding alkohol terbukti lebih unggul dimana memiliki angka setana yang tinggi, *flashpoint* yang tinggi, mampu menghasilkan performa yang lebih besar, memberi pelumasan yang baik terhadap mesin, mengurangi asap dan gas buang secara signifikan dan harga dari biodiesel yang relatif murah (Bustaman, 2009). Walaupun biodiesel memiliki kelemahan yaitu viskositas yang tinggi sehingga

mempengaruhi atomisasi bahan bakar. Karena itu viskositas biodiesel perlu diturunkan dengan cara memberi perlakuan *preheating* atau melalui proses transesterifikasi metil ester nabati sehingga bisa menghasilkan bahan bakar yang persis atau sama dengan sifat dari solar murni (Devita, 2015).

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa B20 merupakan kadar terbaik pada rasio kompresi 19.5 karena biodiesel memiliki angka setana yang lebih tinggi dibandingkan solar sehingga pembakaran yang terjadi lebih sempurna (Mohamad Tajul, 2016) rasio kompresi yang tinggi juga bisa memperbaiki karakteristik biodiesel yang buruk (Sivaganesan *et al*, 2017).





BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari analisis dan pengolahan data yang telah dilakukan dari hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Memodifikasi mesin dengan cara menaikkan rasio kompresi merupakan salah satu cara untuk memperbaiki karakteristik biodiesel.
2. Pada rasio kompresi 15.5 performa mesin diesel menggunakan biodiesel castor oil terbukti menurun jika dibandingkan dengan solar murni.
3. Pada rasio kompresi 17.5 dan 19.5 penggunaan biodiesel justru bisa menaikkan performa mesin diesel.
4. Performa terbaik solar murni diperoleh saat kompresi 19.5 dengan torsi sebesar 0.399 kgf.m, daya efektif sebesar 1.337 PS, nilai SFCe sebesar 0.234 kg/PS.Jam dan efisiensi termal efektif sebesar 24.156 %.
5. Pada rasio kompresi 19.5 penggunaan biodiesel B20 mampu meningkatkan torsi sebesar 5.26%, daya efektif sebesar 5.24% dan efisiensi termal efektif sebesar 6.99 % namun terjadi peningkatan nilai SFCe sebesar 1.28 % dibanding dengan solar.
6. Rasio kompresi terbaik dan penggunaan biodiesel memberikan hasil yang paling baik dalam penggunaan rasio kompresi 19.5 dan dengan kadar biodiesel castor oil sebesar 20% (B20) karena pada biodiesel memiliki angka setana yang tinggi dan penggunaan rasio kompresi yang tinggi bisa memperbaiki karakteristik biodiesel.

5.2 Saran

1. Diperlukan tinjauan lebih lanjut tentang karakteristik pembakaran campuran bahan bakar biodiesel *castor oil* dan solar
2. Diperlukan pengujian tentang tekanan efektif silinder, angka setana, *autoignition temperature* dan *ignition delay*.
3. Untuk penelitian lebih lanjut diperlukan variasi rasio kompresi dan kadar campuran biodiesel yang lebih tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal AK, (2007), *Biofuels (Alcohol and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engine*, Elsevier, 33, pp. 60-71.
- Arismunandar, Wiranto & Tsuda Koichi. (1993). *Motor Diesel Putaran Tinggi*. Jakarta: Pradya Paramita.
- Aziz, Isalmi. (2010). *Uji Performance Mesin Diesel Menggunakan Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas*. Jurnal Valensi. Vol 1. e-ISSN: 2548-3031.
- Basuki, Rahmat. (2014). Bagian – Bagian Mesin Diesel. *Dasar-Dasar Motor Diesel*, hal. 2.
- Budiman, Arif., Ratna Dewi K., Yano Surya P. & Ni'mah Ayu L. (2017). *Biodiesel Bahan Baku Proses dan Teknologi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Bustaman, S. 2009. *Strategi Pengembangan Industri Biodiesel Berbasis Kelapa di Maluku*. Jurnal Litbang Pertanian, 28(2): 46-53.
- Cengel, Yunus A. & Michael A. Boles, (2014). *Thermodynamics An Engineering Approach Seventh Edition*. New York: Mc Graw Hill Inc.
- Chevron. (2005). *Diesels Fuels Technical Reviews*. California, USA: Chevron Products Company
- Dennis, Hasahatan., Joko Sunaryo & Nurul Komariah Leily. (2012). *Pengaruh Rasio H_2SO_4 Terhadap Kuantitas dan Kualitas Biodiesel dari Minyak Jarak*. Jurusan Teknik Kimia, Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Devita, Liza. (2015). *Biodiesel Sebagai Bioenergi Alternatif Dan Prospektif*. Agrica Ekstensia Vol. 9 No. 2 : 23 – 26. Sekolah Tinggi Penyuluhan Pertanian: Medan.
- Dharsono, W., dan Y.S. Oktari. 2010. *Proses Produksi Biodiesel dari Dedak dan Metanol dengan Eesterifikasi In Situ*. *Skripsi*. Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik. Universitas Diponogoro. Semarang. 64 hlm.
- Havendri, Adly. (2008). *Kaji Experimental Prestasi dan Emisi Gas Buang Motor Bakar Diesel Menggunakan Variasi Campuran Bahan Bakar Biodiesel Minyak Jarak (Jatropha curcas l) Dengan Solar*. Padang: Universitas Andalas.
- Hariram, V. & S. Vasanthaseelan. (2015). *Optimization of Base catalyzed Transesterification and Characterization of Brassica napus (Canola seed) for the production of Biodiesel*. *International Journal of ChemTech Research* 8. 9: 418-423.
- Izusu. (2000). *Mekanisme Mesin Diesel & Bensin*. Jakarta : Izusu.
- Jaichandar, S. & K. Annamalai. (2017). *Experimental Investigation On The Influences Of Varying Injection Timing On The Performance Of A B20 JOME Biodiesel Fueled Diesel Engine*. *Journal of Mechanical Engineering*.
- Jianjun, Zheng & Zouhua H. (2009). *Effect Of Compression Ratio On Cycle By Cycle Variations In Natural Gas Direct Injection Engine*. *Energy Fuels*. 23: 5357-5366.

- John B, Heywood. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York : Mc Graw Hill Inc.
- Kristanto, Philip. (2015). *Motor Bakar Torak-Teori & Aplikasinya*. Yogyakarta : CV. Andi Offset.
- Kusuma, I. (2003). *Pembuatan biodiesel dari minyak jelantah dan pengujian terhadap prestasi kerja mesin diesel*. Poros. 6(4):227-234.
- Leily, Nurul Komariah., Winda Dwi Juliani & Moch. Farid Dimiyati. (2013). *Efek Pemanasan Campuran Biodiesel dan Minyak Solar Terhadap Konsumsi Bahan Bakar pada Boiler*. Jurusan Teknik Kimia, Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Mariyamah, M. (2017). *Analisa Konsumsi Penggunaan Bahan Bakar Campuran Biodiesel Jarak Pagar dan Solar pada Boiler*. Alkimia. Vol 1. No. 1.
- Modul Praktikum Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Murugesan, A. & Umarani, C. & Chinnusamy, T.R. & Krishnan, M. & Subramanian, R. & Neduzchezhain, N. (2009). "Production and analysis of bio-diesel from non-edible oils-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 13(4), pages 825-834, May.
- Mutlu, H. & Meier, M. A. R. (2010). *Castor Oil as A Renewable Resource for The Chemical Industry*. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 112(1): 10.
- Pramanik, K. (2003). *Properties And Use Of Jatropha Curcas Oil And Diesel Fuel Blends In Compression Ignition Engine*. *Renewable Energy*. Volume 28. 2:239-248.
- Prastyanto B, Sudarmanta B. (2012). *Pengaruh penambahan biodiesel dari minyak biji nyamplung (C. inophyllum) pada bahan bakar solar terhadap hasil uji unjuk kerja mesin diesel generator*. J Tek Pomits. 1(1):1-6.
- Premnath, S. & G. Devaradjane. (2014). *Improving the Performance and Emission Characteristics of A Single Cylinder Diesel Engine Having Reentrant Combustion Chamber Using Diesel and Jathropa Methyl Esters*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 121: 10-15.
- Pudjanarsa, Astu & Djati Nursuhud. (2012). *Mesin Konversi Energi Edisi Ketiga*. Yogyakarta: CV. ANDI OFFSET.
- Rabiman, Zainal A. (2011). *Sistem Bahan Bakar Motor Diesel*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Raheman, H. & S.V. Ghadge. (2008). *Performance of Diesel Engine with Biodiesel at Varying Compression Ratio and Ignition Timing*. *Fuel*. 87: 2659-2666.
- Roji, S. S. Selva., R. Edwin Raj, D. F. Melvin Jose & Z. Robert Kennedy. (2015). *Effect of Compression ratio with Biodiesel and Its Blends on Performance and Emission Characteristics of An IC Engine*. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 16. 2: 601-609.
- Romano, S. D. & Sorichetti P. A. (2011). *Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization*. *Standards for fuel characterization*. 8: 29-41.

- Sayin, C. (2010). *Engine Performance and Exhaust Gas Emissions of Methanol and Ethanol-Diesel Blends*. *Fuel*. 89(11), 3410-3415.
- Setyadji, Moch., Mashudi & Endang Susiantini. (2003). *Studi Pembuatan minyak Biodiesel Dari Biji Jarak*. Puslitbang Teknologi Maju BATAN : Yogyakarta. ISSN 0216 – 3128.
- Singh, B. & S.K. Shukla. (2016). *Experimental Analysis of Combustion Characteristics on A Variable Compression Ratio Engine Fuelled with Biodiesel (Castor Oil) and Diesel Blends*. *Biofuels*. 20: 7269-7277
- Sivaganesan, S., M Chandrasekaran & M Ruban. (2017). *Impact of Various Compression Ratio on the Compression Ignition Engine with Diesel and Jathropa Biodiesel*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 183: 012039.
- Standar Nasional Indonesia. (2015). *Biodiesel*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. SNI 7182: 2015.
- Suhartanta & Zainal Arifin. (2008). *Pemanfaatan Minyak Jarak Pagar Sebagai Bahan Bakar Alternatif Mesin Diesel*. *Jurnal Penelitian Saintek*. Vol 13. 1: 19-46.
- Syaiful, Stefan Mardikus, M. W. Bae and Kazuo Tsuciya, (2013), *Effect of Exhaust Gas Recirculation on Smoke Emission in a Direct Injection (DI) Diesel Engine Fueled Diesel/Low Purity Methanol (LPM) Blends*, *The Seventh international Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering (ISMAI)*, ISMAI07-EP-01, pp. 147-151.
- Tajul, Mohamad & Muhaji. (2016). *Pengaruh campuran bahan bakar biodiesel dari minyak biji jarak dengan solar terhadap kinerja dan opasitas mesin diesel empat langkah*. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- Walid, Najibullah., H. Abdul Wahab & Ena Marlina. (2017). *Pengaruh Penambahan Bahan Bakar Minyak Jarak dan Bioaditif Terhadap Performa dan Emisi Gas Buang Pada Mesin Diesel*. Jurusan Teknik Mesin, Malang: Universitas Islam Malang.
- Wardana, I.N.G. (2008). *Bahan Bakar & Teknologi Pembakaran*. Malang: PT. Danar Wijaya.
- Widianto, Andi. (2014). *Uji Kemampuan Campuran Bahan Bakar Solar-Biodiesel Dari Minyak Biji Jarak Terhadap Unjuk Kerja Dan Opasitas Mesin Diesel 4 Langkah*. Surabaya: PPs Universitas Negeri Surabaya.
- Yanmar Service Manual. (2016). *Yanmar Service Manual L40-L100 Air Cooled LA Series Industrial Diesel Engine*, hal. 30.
- Zhu L, Cheung CS, Zhang WG, Huang Z. (2010). *Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol*, Elsevier, 408, pp. 914-921.